

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**VALIDACION NUMERICA DE LA CUANTIFICACION DEL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS**

TRABAJO DE TITULACION PREVIO
A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERA CIVIL

DIRECTORA:

Ing. Verónica Margarita Carrillo Serrano MSc.
C.I.0104040480

AUTORA:

Bernarda Elizabeth Aguirre Almeida
C.I.0104829908

CUENCA – ECUADOR

2017



Resumen

Hoy en día, la modelación numérica es la clave para el diseño de obras hidráulicas, pues las simulaciones son más económicas, permiten un análisis de sensibilidad, además que es posible analizar sistemas de mayor complejidad con menor número de suposiciones y proyectar distintos escenarios con sus posibles efectos de futura actuación. La modelación numérica es también una alternativa eficiente que facilita el cálculo de problemas naturales a grande escala como es el caso de problemas por acumulación de sedimentos. El transporte de sedimentos con partículas de diámetro uniforme constituye una gran interrogante cuando el área de estudio comprende canales de pendientes pronunciadas. Este trabajo tiene como objetivo la validación numérica de la experimentación realizada en laboratorio para procesos de transporte de sedimento aplicada en pendientes elevadas (3%-5%) y partículas de diámetro y forma uniforme. La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo consiste en la aplicación de un modelo numérico (Flow 3D) para la validación de experimentación en laboratorio. Los resultados que se obtendrán son parámetros de flujo que sean comparables con los medidos en laboratorio, como: velocidades y calados, y tasas de transporte de sedimento. La modelación numérica nos permite tener una herramienta para realizar una evaluación integral de los procesos hidráulicos, que comprende experimentación en laboratorio, modelos matemáticos como teoría y modelos numéricos para la solución de las ecuaciones de gobierno.

Palabras Claves: Transporte de carga de lecho, Sediment Scour, Validación Numérica, Tasas de Transporte



Abstract

Today numerical modeling is the key to the design of hydraulic works. Well, simulations are cheaper and they allow a sensitivity analysis. Also, it is possible to analyze more complex systems with fewer assumptions and project different scenarios with their possible effects of future action. Numerical modeling is also an efficient alternative that simplifies the calculation of natural problems on large scale such as the problems of sediment accumulation. The transportation of sediments with particles of uniform diameter constitutes a big question when the study area includes channels of steep slopes. The objective of this project is the numerical validation of the experiments carried out in the laboratory for sediment transport processes applied on high slopes (3% -5%) and particles of uniform diameter and shape. The methodology used for the development of this project consists of the application of a numerical model (Flow 3D) for the validation of laboratory experiments. The results to be obtained are flow parameters that are comparable with the measured in the laboratory such as: speed and draughts and sediment transport rates. Numerical modeling allows us to perform a complete evaluation of hydraulic processes that includes experiments in laboratory, mathematical models such as theory and numerical models for the solution of governing equations.

Key words: Bed transport, Sediment Scour Numerical Validation, Transport rates



Contenido

1	INTRODUCCION	12
1.1	Antecedentes y Justificación	12
1.2	Objetivos	14
1.3	Hipótesis	15
2	MATERIALES Y METODOS	16
2.1	Transporte de Sedimentos:	16
2.2	Modelos Numéricos:	20
2.3	Flow 3D:	22
	Esfuerzo Cortante:	23
	Acorazamiento del Rio	25
	Deposición	27
	Transporte de carga de fondo	28
2.4	Datos experimentales	30
2.5	Verificación de Correspondencia	32
2.6	Simulaciones Numéricas	32
3.	RESULTADOS Y DISCUSION	39
3.1	Análisis de Bondad de la malla	39
3.2	Variación de la altura neta del paquete de sedimentos	42
3.3	Tasas de Transporte	47
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
5.	BIBLIOGRAFIA	52
6.	ANEXOS	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fondo inclinado y dirección del flujo	27
Figura 2 Geometría del canal a ser simulada.....	33
Figura 3 Condiciones de Frontera para el canal a ser simulado.	34
Figura 4 Puntos de Control del canal con vista z (+)	37
Figura 5 Simulación: Pendiente 4.5% Caso A	39
Figura 6 Simulación: Pendiente 4.5% Caso B.....	39
Figura 7 Simulación: Pendiente 4.5% Caso C.....	40
Figura 8 Simulación: Pendiente 3% Caso D	40
Figura 9 Simulación: Pendiente 3.5% Caso D.....	40
Figura 10 Simulación: Pendiente 4.5% Caso D.....	41
Figura 11 Simulación: Pendiente 5% Caso D	41
Figura 12 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 44s como se puede apreciar en el gráfico.	42
Figura 13 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.	43
Figura 14 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 22s.....	44
Figura 15 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 22 s. ...	44
Figura 16 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 44s.	45
Figura 17 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 44s. ...	45
Figura 18 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación	46
Figura 19 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 21 s.	46
Figura 20 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a los 44s.	46
Figura 21 Diferencias entre tasas de transporte de sedimento con mallado de 6 mm.	49
Figura 22 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 74s.	55
Figura 23 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s	55
Figura 24 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 37s.....	56
Figura 25 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 37 s. ...	56
Figura 26 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 74s.	57



Figura 27 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 74 s. ...	57
Figura 28 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación	58
Figura 29 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 37 s.	58
Figura 30 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 74 s.	58
Figura 31 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 61s.	59
Figura 32 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.	59
Figura 33 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 31s.	60
Figura 34 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 31 s. ...	60
Figura 35 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 61s.	61
Figura 36 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 61 s. ...	61
Figura 37 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.	62
Figura 38 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 31 s.	62
Figura 39 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 61 s.	62
Figura 40 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 54s.	63
Figura 41 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.	63
Figura 42 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 27s.	64
Figura 43 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 27s. ...	64
Figura 44 Figura 42 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 54s.	65
Figura 45 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 54 s. ...	65
Figura 46 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.	66
Figura 47 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 27 s.	66
Figura 48 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 54 s.	66



Figura 49 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 50s.	67
Figura 50 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.	67
Figura 51 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 25s.	68
Figura 52 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 25 s.	68
Figura 53 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 50s.	69
Figura 54 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 50 s.	69
Figura 55 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.	70
Figura 56 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 25 s.	70
Figura 57 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 50 s.	70
Figura 58 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 55s.	71
Figura 59 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.	71
Figura 60 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 27s.	72
Figura 61 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 27 s.	72
Figura 62 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 55s.	73
Figura 63 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 55 s.	73
Figura 64 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.	74
Figura 65 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 27 s.	74
Figura 66 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 55 s.	74
Figura 67 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 54s.	75
Figura 68 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.	75
Figura 69 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 26s.	76
Figura 70 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 26 s.	76



Figura 71 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 54s.	77
Figura 72 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 54 s. ...	77
Figura 73 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.	78
Figura 74 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 26 s.	78
Figura 75 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 54 s.	78

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables experimentales ensayadas en la simulación física.	31
Tabla 2 Variables ensayadas en la simulación numérica.	33
Tabla 3 Coordenadas en metros de los puntos de control.	37
Tabla 4 Tiempos necesarios para el arrastre de 0.12 m ³ de volumen de sedimento mediante la simulación numérica	47
Tabla 5 Comparación de las tasas de transporte del modelo en laboratorio, teórica, y de la simulación mediante Flow 3D.	48



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional



Universidad de Cuenca
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Bernarda Elizabeth Aguirre Almeida en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Validación numérica de la cuantificación de transporte de sedimentos**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 25 de octubre de 2017

Bernarda Elizabeth Aguirre Almeida

C.I: 0104829908



Cláusula de Propiedad Intelectual

Cláusula de Propiedad Intelectual

Bernarda Elizabeth Aguirre Almeida, autor/a del trabajo de titulación "**validación numérica de la cuantificación de transporte de sedimentos**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 25 de octubre de 2017

Bernarda Elizabeth Aguirre Almeida

C.I: 0104829908



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A mis padres Francisco y Raquel, y mi hermano Francisco por su incondicional apoyo y respaldo en todos estos años, a mi enamorado Mateo por la motivación y haberme guiado en cada paso de toda esta trayectoria universitaria, a mi familia y amigos por su apoyo y cariño. Por ellos todo esto es posible.

Bernarda



Agradecimiento

Son muchas las personas que me han ayudado de varias maneras para culminar con éxito este trabajo, agradezco a Dios por la fuerza brindada cada día, a mi directora de trabajo de titulación Ing. MSc. Verónica Carrillo por su incondicional apoyo y dedicación, a los Ingenieros Edwin Casa, Carlos Buñay y Fredy Pacheco por su colaboración, a los profesores que motivaron mi desarrollo académico en la Universidad.

Bernarda



1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes y Justificación

La determinación de parámetros de flujo precisos para el adecuado diseño de obras hidráulicas es un proceso complejo debido al gran número de factores que intervienen y a su variabilidad temporal y espacial, generalmente se utilizan teorías simplificadas y aproximaciones experimentales como aproximación a la realidad, dando como resultado estimaciones que no siempre son valores cercanos a los reales (Guarin Corredor, 2014). El transporte de sedimentos es un proceso natural de gran importancia en la dinámica de los ríos, que es muy complejo ya que a más de la determinación de la dinámica del flujo del fluido se debe establecer los parámetros de movimiento del sedimento así como también la interacción entre la fase líquida y la fase de sedimento (Carling & Reader, 1982; López, Vericat, & Batalla, 2014; Papanicolaou, Bdour, & Wicklein, 2010). Hoy en día la modelación numérica se constituye en una herramienta altamente competitiva para analizar fenómenos de flujo complejo y con esto optimizar el diseño de obras hidráulicas, ya que se resuelven las ecuaciones de gobierno del flujo de fluidos y por lo tanto, a pesar de que en efecto la modelación numérica también tiene ciertas simplificaciones que se aplican en el proceso dan resultados confiables. Una ventaja predominante de los modelos numéricos es que las simulaciones son más económicas comparadas con la construcción de un modelo físico, y permiten el análisis de varios escenarios con relativa facilidad, que a su vez permite proyectar los posibles efectos de una determinada configuración proyectada.(Ferziger & Milovan, 2002). Por lo que la modelación numérica es una herramienta eficiente que se puede utilizar para el análisis del proceso de transporte de sedimento.



Para este propósito, existen diferentes paquetes de modelación hidráulica, los cuales se pueden clasificar en función de las ecuaciones que se resuelven y del método numérico utilizado. Dependiendo de las ecuaciones que se resuelven, se identifican los programas que van desde aquellos que utilizan la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y resuelven las ecuaciones de Navier Stokes discretizadas, hasta los modelos unidimensionales como por ejemplo HEC-RAS que resuelve las ecuaciones de Saint Venant en una dirección (Ruiz & Narváez, 2015; Salamea Guillen, 2015). En términos del método de discretización utilizado, se identifican el método de volúmenes finitos, elementos finitos y volumen de fluido entre los principales. La definición del modelo más idóneo dependerá del proceso natural a estudiar, de la disponibilidad de datos para la calibración y validación del modelo y de los recursos necesarios para la simulación (principalmente computacionales) (Ferziger & Milovan, 2002).

La aplicación de modelos numéricos para el estudio de los procesos hidráulicos de flujo se ha incrementado considerablemente en los últimos años debido al desarrollo de las capacidades computacionales, permitiendo un mejor entendimiento y representación de éstos fenómenos naturales (Faure, Buil, & Gay, 2004). Dentro de la literatura se pueden encontrar varios estudios de modelación numérica que desarrollan análisis de flujo preferencial y modelos de turbulencia (Nguyen and Nestmann 2004, Leupi and Altinakar 2005, Maselhe et al. 2012). En Ecuador también se han realizado estudios de modelación numérica, entre los estudios que consideran la inclusión de sedimentos se tienen: la modelación unidimensional y bidimensional del transporte, depositación y lavado de sedimentos para el embalse Paute-Cardenillo (Castillo, Alvarez, & Carrillo, 2011), la modelación hidrodinámica bidimensional del flujo y transporte de sedimentos a través del río Calabí y las obras hidráulicas proyectadas en el río (Salamea Guillen, 2015), entre los más representativos.



A pesar de que algunos estudios se han desarrollado principalmente en una y dos dimensiones, la naturaleza altamente tridimensional de la mayoría de los fenómenos hidráulicos explica porque estos estudios (1D y 2D) reportan errores de varios órdenes de magnitud, cuando son comparados con valores medidos (Lane, Bradbrook, Richards, Biron, & Roy, 1999). Es por esto que surge la necesidad de implementar modelos tridimensionales que repliquen de manera más adecuada los procesos naturales, como por ejemplo el transporte de sedimentos en causes de gran pendiente y con sedimento grueso.

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar una validación numérica (mediante simulaciones numéricas) de la experimentación elaborada en laboratorio para procesos de transporte de sedimentos para pendientes elevadas (3-5%) y partículas de diámetro y forma uniforme.

La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo consiste en la aplicación de un modelo numérico CFD para la validación de la experimentación en laboratorio. El modelo numérico que se aplicará es Flow 3D, este programa usa elementos hexaédricos en una malla estructurada y un método de diferencias y volúmenes finitos (cuya aplicación difiere del fenómeno a analizar) con lo que otorga resultados resolviendo en un dominio discreto las ecuaciones de Navier-Stokes. Para el análisis del fenómeno de sedimentos, se conoce que el programa tiene el transporte suspendido de sedimentos y un modelo empírico de erosión de lecho (Guo, 2002; Mastbergen y Von den Berg, 2003; Brethour y Burnham, 2011). El transporte de carga de lecho se calcula utilizando las expresiones propuestas por Meyer-Peter & Müller, 1948 y Van Rijn, 1986.



Para la verificación de la correspondencia entre modelo numérico y simulación en laboratorio se establecerán los porcentajes de diferencia (error) entre los resultados del modelo numérico y los del laboratorio, que se consideraran como los resultados reales, mediante el cálculo de la diferencia absoluta.

Los resultados esperados son parámetros de flujo que sean comparables con los medidos en laboratorio, como: tasas de transporte de sedimento y los porcentajes totales de error obtenidos en la comparación de las tasas de transporte de sedimentos.

La incorporación de la modelación numérica permite tener una evaluación integral de los procesos hidráulicos, que comprenden experimentación en laboratorio, modelos matemáticos (teoría) y modelos numéricos (solución de las ecuaciones de gobierno).

1.2 Objetivos

Objetivo General

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar una validación numérica de la experimentación elaborada en laboratorio para procesos de transporte de sedimentos para pendientes elevadas (3-5%) y partículas de diámetro y forma uniforme.

Objetivos específicos

- Implementar un modelo numérico para replicar las simulaciones realizadas en laboratorio.
- Determinar las tasas de transporte mediante modelación numérica.
- Establecer la correspondencia entre las tasas obtenidas en laboratorio y en modelo numérico.



1.3 Hipótesis

La poca disponibilidad de estudios de tasas de transporte de carga de lecho para ríos de montaña, sumada a la inexactitud de ecuaciones existentes para estos casos genera la hipótesis, de que para condiciones de alta pendiente y tamaño de sedimento grueso, los modelos existentes no generan resultados confiables produciéndose errores entre valores medidos y calculados, de varios ordenes de magnitud, por lo que se propone realizar una validación numérica de las ecuaciones obtenidas mediante experimentación en laboratorio, en la cual se ha desarrollado una configuración experimental que replica las condiciones (o gran parte de ellas) que se esperan en los ríos de montaña. Para la validación se plantea una serie de análisis de los parámetros de entrada, a la vez que se pretende replicar las condiciones de la configuración experimental, buscando una aproximación mediante un modelo numérico a las condiciones reales. Implementando así un modelo numérico que brinde resultados como tasas de transporte, velocidades y calados en puntos específicos de análisis, permitiendo simular varios escenarios en un relativamente corto tiempo, con un bajo costo y utilización de recursos.



2 MATERIALES Y METODOS

La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo consiste en la aplicación de un modelo numérico CFD para la validación de la experimentación en laboratorio.

2.1 Transporte de Sedimentos:

El fenómeno de transportar partículas más pesadas que el agua, socavar los lechos de canales naturales y de depositar los materiales en el fondo, modificando así la topografía del lecho, se conoce como transporte de sedimentos. El análisis del proceso de transporte de sedimento es de gran importancia para predecir riesgos de socavación, cambios en la forma del lecho de cauces naturales, estimar la sedimentación en las secciones de puentes, vertederos, orillas de canales, y embalses, con su consecuente pérdida de capacidad de almacenamiento (Chanson, 2002).

El inicio del movimiento de las partículas de sedimento ocurre cuando el esfuerzo cortante producido por el agua excede el valor crítico del material presente en el lecho. El movimiento o transporte de sedimento se realiza mediante algunos mecanismos que pueden ser transporte en suspensión, y transporte de carga de lecho que a su vez puede ser por deslizamiento, rodando o saltando (García Flores & Maza Alvares, 2002). El problema radica en que no existe un claro concepto entre la diferencia de los modos de transporte. Según la teoría desarrollada por Hans Albert Einstein (1950), el transporte de fondo ocurre hasta una distancia de dos diámetros de la partícula, por otro lado Van Rijn (1987) define el límite del transporte de fondo estableciendo la distancia a que las partículas saltarán en el flujo, mientras que (Chanson, 2002) diferencia dos tipos de transporte de material, la carga de lecho que se caracteriza por granos que ruedan a lo largo del fondo mientras que la carga en suspensión se refiere a granos mantenidos en suspensión por la turbulencia del agua (Nils & Olsen, 2014).



El esfuerzo cortante crítico de una partícula de sedimento es definido como el esfuerzo cortante mínimo necesario para la iniciación del movimiento de las partículas. (Dubuat, 1779) introdujo por primera vez el concepto del esfuerzo cortante en el lecho y realizó experimentos sobre el movimiento de las partículas que lo componen. Desde entonces se han propuesto muchas expresiones, en su mayoría basadas en el criterio del esfuerzo cortante crítico, para predecir las condiciones de iniciación del movimiento de partículas (Pierre & Julien, 2010). La relación que ha sido ampliamente utilizada para describir la iniciación del movimiento fue propuesta por (Shields, 1936) quien llevó a cabo experimentos sistemáticos para determinar el esfuerzo cortante crítico adimensional en función del número de Reynolds de las partículas (Aguirre-Pe, Olivero, & Moncada, 2000).

La relación de Shields se expresa como

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{oc}}{(\gamma_s - \gamma)D} = f\left(\frac{Du_*}{\nu}\right) \quad (1)$$

Donde:

- f indica una función
- τ_{oc} es el esfuerzo cortante que se produce en el contorno para la iniciación del movimiento,
- τ_c^* es su valor adimensional
- γ_s y γ son los pesos específicos de la partícula y del fluido respectivamente
- D es el diámetro de la partícula, $u_* = (\tau_{oc}/\rho)^{1/2}$ es la velocidad de corte, (ρ es la densidad del fluido y ν es la viscosidad cinemática) y
- Du_* / ν es el número de Reynolds de la velocidad de corte,



El número de Reynolds se puede expresar en términos del espesor δ de la sub-capa límite laminar del contorno como:

$$R_* = \frac{Du_*}{\nu} = 11.6 \frac{D}{\delta} \quad (2)$$

La cual indica que el efecto de fricción en la sub-capa límite laminar es función de la sumersión de la rugosidad del contorno en la sub-capa límite viscosa. El parámetro adimensional de Shields se relaciona con el número de Reynolds del contorno según la expresión:

$$D^* = \left[\frac{R^*}{\tau_c^{*1/2}} \right]^{2/3} \quad (3)$$

Donde

- D^* (diámetro adimensional de la partícula) está dado por:

$$D^* = D \left[\frac{g\Delta}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

Donde:

- g es la aceleración de gravedad
- $\Delta = (\gamma_s - \gamma)/\gamma$

Adicionalmente (Aguirre-Pe et al., 2000) Maza y García (1996) obtuvieron una expresión para τ_c^* en función de D^* , siguiendo el procedimiento desarrollado por Fuentes y Carrasquel (1978). Esta es:

$$\tau_c^* = \frac{0.097}{R_c^*} + 0.077 \exp \left[- \left(\frac{19.58}{R_c^*} \right)^{0.3191} \right] \quad (5)$$



Válida en el intervalo $1 \leq R^*c \leq 1500$. Para $R^*c > 1500$, τ^*c vale 0,06. Pero la capa límite, tal como es considerada por la teoría familiar (Schlichting, 1968) pierde significado físico en cauces de pendientes pronunciadas con rugosidad relativa alta, tal que, $d/D < 10$; donde d es la profundidad media del flujo, D es el diámetro característico de las partículas en el fondo y R^*c es el número de Reynolds crítico del contorno.

Es conocido que el agua es uno de los principales agentes que provoca la erosión y el transporte del material erodado, lo que hace que este proceso sea de gran interés para la hidráulica. Es importante conocer las tasas de producción de sedimentos que habrá en un cierto tiempo, para que con estos datos se puedan mitigar posibles consecuencias que podría provocar este arrastre, así como diseñar las obras hidráulicas que se verán afectadas por este fenómeno. Generalmente no existen metodologías absolutas, que permitan determinar el transporte de sedimentos en canales de alta pendiente o en ríos, es por esto que se ha considerado necesario realizar una investigación más profunda detallada de métodos que permitan cuantificar con mayor precisión este fenómeno (Calva Sarango, 2013). Sin embargo existe una gran variedad de modelos numéricos que intentan cuantificar el proceso de transporte de sedimento como lo es el caso de Flow 3D, que para la obtención del transporte de sedimentos utiliza las ecuaciones de Van Rijn, 1986, y Meyer-Peter & Müller, 1948:

$$\frac{qs}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (6)$$

Donde

- qs : Caudal de sedimentos por unidad de ancho
- s : Peso específico relativo de las partículas
- g : Aceleración por gravedad
- d_s : diámetro del sedimento representativo esfuerzo
- τ_* : Esfuerzo cortante adimensional o parámetro de estabilidad de Shields
- τ_{*c} : Valor crítico del parámetro de estabilidad de Shields esfuerzo



2.2 Modelos Numéricos:

La aplicación de simulaciones numéricas como herramienta de soporte para la solución de problemas en ingeniería ha aumentado considerablemente en los últimos años debido al avance en las prestaciones de los sistemas computacionales (Faure, Buil, & Gay, 2004). La dinámica de fluidos computacional (computational fluid dynamics, CFD) basada en la solución numérica en un dominio discreto de las ecuaciones de gobierno del flujo de fluidos (ecuaciones Navier-Stokes) y con el soporte de los sistemas computacionales permite el análisis de procesos de flujo complejos (Patankar, 1980).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) tiene también la capacidad de relacionar el movimiento de los fluidos con los fenómenos que se pueden dar como consecuencia de dicho movimiento; tales como transferencia de calor, reacciones químicas, transporte de sólidos, etc. Una de las principales ventajas de la CFD dentro de la ingeniería civil es que permite el análisis de diferentes escenarios que contribuyen al óptimo diseño, evaluación, optimización y nuevos desarrollos dentro de la investigación en proyectos hidráulicos (D. José María Carrillo Sánchez, 2014). El estudio de la interacción de fluidos con obras de infraestructura, se ha desarrollado principalmente con el objeto de determinar los parámetros críticos que contribuyen al adecuado funcionamiento del sistema fluido-estructura, mediante la comparación entre los resultados de modelaciones numéricas con aquellos de modelos físicos o experimentales y verificar la correspondencia de los mismos, o identificar las causas de las divergencias (Hidalgo, Castro, Casa, Dávila, & Ortega, 2015; RODRIGO ROY, 2014).



Las ecuaciones de gobierno que se resuelven mediante la CFD son las ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, en su forma de ecuación de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento. Mediante la metodología propuesta por la CFD se obtiene una solución aproximada respecto de los valores reales sobre la base de una discretización del dominio adecuada. Las ecuaciones diferenciales se reemplazan por un sistema de ecuaciones algebraicas, y pueden así ser resueltas de manera relativamente simple. Estas aproximaciones se aplican a pequeños dominios dentro del espacio y tiempo, por lo que sus resultados se encuentran en las denominadas locaciones discretizadas. Entonces, los resultados dependerán de la calidad de la discretización que se utilizaría (Ferziger & Milovan, 2002).

La modelación numérica puede tener numerosas ventajas así como inconvenientes, pues esta está sujeta a limitaciones tales como la capacidad y rapidez de los computadores o estaciones de cómputo, condiciones de contorno, la estabilidad y convergencia en la solución. Se pueden definir como ventajas de los modelos numéricos a: la posibilidad de análisis de varios escenarios, en tiempos relativamente cortos y a costos bajos, la consideración de problemas complejos con relativa simplicidad, a pesar de que el dominio no es continuo si no discreto, se tiene mayor detalle de los parámetros de flujo que en el caso de una simulación experimental en la que solo se realizan mediciones puntuales. Adicionalmente, la fuente de errores en el caso de las simulaciones numéricas es controlada, y a pesar de que no se puede eliminar, se puede reducir a valores despreciables, en contraste a los errores de las simulaciones experimentales que no son fácilmente detectables y menos aún factibles de eliminar (D. José María Carrillo Sánchez, 2014; Flow Science, 2014).



Existe una gran variedad de paquetes computacionales que aplican la CFD, con una amplia gama de prestaciones y características, van desde paquetes comerciales como el FLUENT, FIDAP, ANSYS, FLOW 3D, hasta los paquetes de código libre como OpenFOAM, OpenCFD, entre los principales (Ardila M., Hincapié Z., & Casas M., 2015; Tampier Brockhaus & Salas Inzunza, 2011). A pesar de las simplificaciones que incluye, debido a las innegables ventajas que ofrece la modelación numérica ha llegado a constituirse como una herramienta de soporte para el análisis y la toma de decisiones para el diseño, construcción y operación de proyectos hidráulicos y la solución de problemas ambientales (Ruiz & Narváez, 2015).

2.3 Flow 3D:

Después de un análisis preliminar de las características y requerimientos de varios modelos numéricos, el modelo que se ha seleccionado para la validación del proceso experimental, es Flow 3D 11.2, el cual otorga resultados mediante un solucionador tridimensional de las ecuaciones de Reynolds-Navier Stokes. Este programa utiliza para este fenómeno el método de volúmenes finitos y resuelve el campo fluido dinámico a partir de la siguiente secuencia (Casa Tipán, 2016):

1. El dominio continuo se discretiza o divide en un valor finito de volúmenes de control. Para modelación tridimensional, las celdas son volumétricas.
2. Se plantean las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento en cada celda.
3. Las ecuaciones a resolver se linealizan para obtener un sistema algebraico de ecuaciones menos complejo.
4. Se resuelve numéricamente de forma iterativa y de esta manera se logra obtener la solución del problema físico simulado



Flow 3D tiene una amplia gama de herramientas y capacidades físicas y numéricas que se han ido perfeccionando con el tiempo, tales como superficies internas incompresibles y flujo externo hipersónico, transferencia de calor, turbulencia, tensión superficial y cambio de fase, deformación y movimiento de sólidos. Esta última herramienta será la utilizada para el desarrollo del presente trabajo. FLOW-3D tiene la capacidad de determinar todos los procesos de transporte de sedimento, incluyendo transporte de carga de lecho, transporte de carga suspendida, arrastre y deposición.

El esfuerzo cortante en el fondo del canal se determina mediante cálculos en las celdas de la malla en la interfaz de lecho, donde se utiliza la localización, orientación y área de la interfaz para la determinación del mismo, así como también del parámetro crítico de Shields, la tasa de erosión y la velocidad de transporte de carga de lecho. El cálculo de la erosión considera el arrastre y la deposición simultáneamente, además del transporte de carga de lecho. La velocidad de sedimentación de los granos se calcula para tener en cuenta la deposición y el transporte de los sedimentos en suspensión (Wei, Brethour, Grünzner, & Burnham, 2014).

La herramienta Flow 3D basa sus modelaciones en la solución numérica de las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo Cortante:

La tensión de corte del fondo es la tensión de cizallamiento aplicada por el fluido sobre la superficie del lecho. Se calcula utilizando la función de pared para flujos de turbulencia en 3D:

$$u = u_{\tau} \left[\frac{1}{k} \ln \left(\frac{Y}{\frac{v}{u_{\tau}} + K_s} \right) \right] \quad (7)$$



Donde

- u_τ es la velocidad de corte, $u_\tau = \tau/\rho$
- τ es la tensión de cizallamiento en el fondo
- ρ es la densidad aparente de la mezcla fluido-sedimento
- Y es la distancia desde la pared
- ν es la viscosidad cinemática del flujo masivo
- $K = 0.4$ es la constante de Von Karman
- k_s es la rugosidad de Nikuradse.

En este modelo, k_s está relacionado con el tamaño de grano como:

$$K_s = C_s \times d_{50} \quad (8)$$

Donde

- d_{50} es el diámetro medio del grano del material del fondo
- C_s es un coeficiente de concentración local del sedimento definible por el usuario. El valor recomendado de C_s es 2,5.

En los flujos de aguas poco profundas, la ley de fricción cuadrática se utiliza para evaluar el esfuerzo de corte en el fondo como:

$$\tau = \rho_f \times C_D \times \bar{V} \times |\bar{V}| \quad (9)$$

Donde

- \bar{V} es la velocidad del fluido promediada en profundidad
- ρ_f es la densidad del fluido



- C_D es el coeficiente de arrastre que puede ser prescrito por los usuarios (valor por defecto es 0,0026) o determinado localmente en términos de rugosidad k_s (Soulsby, 1997):

$$C_D = \left[\frac{K}{B + \ln(Z_o/h)} \right] \quad (10)$$

Con h como la profundidad del agua local, $B = 0.71$, y $Z_o = k_s/30$.

Acorazamiento del Rio

El parámetro Shields es una forma adimensional de esfuerzo cortante de lecho definido como:

$$\theta_n = \frac{\tau}{g \times d_n \times (\rho_n - \rho_f)} \quad (11)$$

Donde

- g es la gravedad en valor absoluto.
- ρ_n es la densidad de masa de los granos sedimentarios.
- ρ_f es la densidad del fluido.
- d_n es el diámetro del grano. El subíndice n representa la n -ésima especie de sedimento.

El parámetro crítico Shields $\theta_{cr,n}$ se utiliza para definir la tensión de cizallamiento crítico $\tau_{cr,n}$, en la que comienza el movimiento del sedimento tanto para el arrastre como para el transporte de carga:

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g \times d_n \times (\rho_n - \rho_f)} \quad (12)$$

El valor base de $\theta_{cr,n}$ es para un lecho plano y horizontal de granos de tamaño idéntico. Puede ser especificado por los usuarios (0,05 por defecto) o determinado por la ecuación de Soulsby-Whitehouse (Soulsby y Whitehouse, 1997):



$$\theta_{cr,n} = \frac{0.3}{1 + 1.2d_{*,n}} + 0.055 \times (1 - e^{-0.02d_{*,n}}) \quad (13)$$

Donde

- $d_{*,n}$ es el tamaño de grano adimensional dado por:

$$d_{*,n} = d_n \left[\frac{g \times (S_{n-1})}{Vf^2} \right]^{1/3} \quad (14)$$

Donde:

- $S_n = \rho n / \rho f$
- Vf es la viscosidad cinemática del fluido.

En una interfaz de lecho inclinado, la gravedad aplica un componente tangencial de fuerza para hacer que el lecho compactado sea más o menos estable dependiendo de la dirección del flujo.

Como resultado, la tensión de corte crítica aumenta si el flujo de fluido sube la pendiente y disminuye si el flujo desciende. Es una opción para los usuarios que $\theta_{cr,n}$ puede modificarse para el efecto de lecho inclinado siguiendo a Soulsby (1997):

$$\theta'_{cr,n} = \theta_{cr,n} \times \frac{\cos \varphi \sin \beta + \sqrt{(\cos \beta)^2 \times (\tan \varphi_n)^2 - (\sin \varphi)^2 \times (\sin \beta)^2}}{\tan \varphi_n} \quad (15)$$

Donde

- β es el ángulo de pendiente del lecho
- φ_n es el ángulo de reposo definido como el ángulo de inclinación más pronunciado antes de que los granos se deslicen por sí solos (valor por defecto es 32 grados).

- ψ es el ángulo entre la dirección ascendente y el flujo de fluido adyacente al lecho inclinado, tal como se muestra en la figura 1, ψ oscila entre 0 y 180 grados, correspondiendo 0 grados al flujo ascendente y 180 grados al descendente.

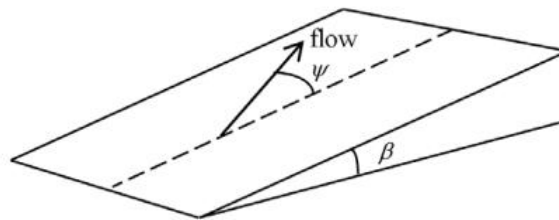


Figura 1 Fondo inclinado y dirección del flujo

Deposición

En este modelo, el arrastre y la deposición se tratan como dos micro-procesos opuestos que tienen lugar al mismo tiempo. Se combinan para determinar la tasa neta de intercambio entre sedimentos depositados y en suspensión. Para el arrastre, la velocidad a la que los granos se empiezan a mover es la velocidad de elevación y se calcula mediante la ecuación de Winterwerp et al. (1992):

$$u_{lift,n} = n_b \times \alpha_n \times d_{*,n}^{0.3} \times (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} \times \sqrt{gd_n(S_n - 1)} \quad (16)$$

Donde

- α_n es el coeficiente de arrastre del tipo n (valor por defecto es 0,018)
- n_b es el vector normal hacia el exterior de la superficie de lecho comprimido.



En la deposición, se utiliza la velocidad de sedimentación de Soulsby (1997):

$$u_{settle,n} = \frac{g}{g} \left[(10.36^2 + 1.049d_{*,n}^3)^{1/2} - 10.36 \right] \times \frac{V_f}{d_n} \quad (17)$$

Donde

- g es la aceleración por gravedad
- $u_{settle,n}$ se asume en la misma dirección de g

Transporte de carga de fondo

La forma adimensional de la velocidad de transporte de la carga de fondo para la especie n se define como:

$$\phi_n = \frac{q_{b,n}}{[g(s_n - 1)d_n^3]^{0.5}} \quad (18)$$

Donde

- q_b , es la velocidad volumétrica de transporte de carga por unidad de ancho de lecho (en unidades de volumen por ancho por tiempo).
- ϕ_n se calcula utilizando la ecuación de Meyer-Peter y Muller (1948):

$$\phi_n = B_n \times (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} \times C_{b,n} \quad (19)$$

Donde

- B_n es el coeficiente de carga del fondo. Generalmente va de 5,0 a 5,7 para el transporte bajo, alrededor de 8,0 para el transporte intermedio y hasta 13,0 para el transporte muy alto. El valor predeterminado que utiliza FLOW-3D es 8.0, que es el valor más utilizado en la literatura.



- $C_{b,n}$ es la fracción volumétrica del tipo de material n en todo el material del lecho.

$$C_{b,n} = \frac{\text{volumen neto del tipo } n}{\text{volumen neto de todos los tipos}} \quad (20)$$

$$\sum_{n=1}^N 1.0 \quad (21)$$

Donde

- N es el número total de diferentes tipos de sedimentos.

Nota $C_{b,n}$ no existe en la ecuación original de Meyer Peter y Muller. Se añade en la ecuación (19) para explicar el efecto de múltiples tipos de sedimentos.

La relación en Van Rijn (1984) se utiliza para estimar el h_n de capa de carga de la capa:

$$h_n = 0.3 \times d_n \times d_{*,n}^{0.7} \times \left(\frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (22)$$

La velocidad $U_{b,n}$ se calcula mediante:

$$u_{b,n} = \frac{q_{b,n}}{h_n \times c_{b,n} \times f_b} \quad (23)$$

Donde

- f_b es la fracción de empaquetamiento total de los sedimentos.
- u_b , y q_b , n están en la dirección del flujo de fluido adyacente a la interfaz de lecho.



2.4 Datos experimentales

Para el análisis de comparación de los resultados de la simulación experimental con los resultados de la simulación numérica se utilizarán como datos de partida, los datos experimentales de velocidades, calados y tasas de transporte de sedimento, obtenidos en el estudio “Análisis de transporte de carga de lecho para partículas gruesas” desarrollado por (Astudillo Matute & Padilla Guarnizo, 2017) en el laboratorio de hidráulica y dinámica de fluidos de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cuenca. A continuación se presentan los datos principales de la experimentación en laboratorio.

Para la modelación física se consideraron 4 casos diferentes:

- Caso A: Sedimentos con partículas de diámetro y forma uniforme (esferas) de 0.010 m de diámetro
- Caso B: Sedimentos con partículas de diámetro y forma uniforme de 0.015 m
- Caso C: Sedimentos con partículas de diámetro y forma uniforme de 0.025 m
- Caso D: Sedimentos con partículas de diámetros variables, que responden a una curva de caracterización granulométrica definida, construida mediante la mezcla de los tres tipos de sedimento antes mencionados y siguiendo la configuración de una cauce de montaña característico.



Para cada ensayo se estableció una pendiente de canal con un fondo fijo, que consistía en colocar una capa inmóvil de esferas y sobre esta una porción móvil de sedimento, el canal donde se desarrolló el estudio experimental tiene paredes de vidrio, una longitud de 12.0m, y sección transversal de 0.30m de ancho y 0.45m de altura. El material usado como partículas de sedimento corresponde a esferas de vidrio con un peso específico $\gamma = 2650 \text{ Kg/m}^3$. Las tasas de transporte se determinaron mediante una trampa aguas debajo del área de simulación registrando la cantidad de material arrastrado (en peso) en un tiempo determinado. Se obtuvieron 500 datos de simulaciones para cada una de las cuales se tiene su respectivo valor de tasa de transporte. En la Tabla 1 que se presenta a continuación se muestra el detalle de las variables con las que se realizó la experimentación (Astudillo Matute & Padilla Guarnizo, 2017).

Tabla 1 Variables experimentales ensayadas en la simulación física.

Φ	Rango	m
(cm)	Q (l/s)	%
1	[4.02 - 23.16]	3.0
		3.5
		4.0
		4.5
		5.0
1.5	[5.06 - 23.16]	3.0
		3.5
		4.0
		4.5
		5.0
2.5	[5.34 - 23.16]	3.0
		3.5
		4.0
		4.5
		5.0
Mezcla	[6.45 - 23.16]	3.0
		3.5
		4.0
		4.5
		5.0



2.5 Verificación de Correspondencia

Para la verificación de la correspondencia entre modelo numérico y simulación en laboratorio se establecieron los porcentajes de diferencia (error) entre los resultados del modelo numérico y los del laboratorio, los cuales se consideraron como el parámetro de comparación, se analizará este porcentaje de error mediante el cálculo de la diferencia absoluta.

$$ERROR = \frac{X - X_o}{X} \quad (24)$$

Donde:

- X: Datos obtenidos mediante el modelo físico
- Xo: Datos obtenidos en la simulación numérica

2.6 Simulaciones Numéricas

Para la validación numérica se realizaron 7 simulaciones, tomadas de combinaciones específicas de las variables presentadas en la tabla 1, las cuales corresponden a los casos extremos de los analizados en la experimentación en laboratorio, estas simulaciones permiten tener un mejor control de los resultados, además de ser en el modelo experimental los casos más próximos a la realidad. Para hallar una relación entre modelo físico y numérico se obtuvo el tiempo de transporte de un volumen específico de sedimento mediante las tasas obtenidas en laboratorio. En la tabla 2 se muestran los parámetros de simulación de la experimentación en laboratorio, con sus respectivos resultados que serán comparados con los resultados de la modelación numérica.

Tabla 2 Variables ensayadas en la simulación numérica.

Pendiente m (%)	Caso	Caudal Q (l/s)	Calado Y (m)	Tasa de Transporte (Kg/s - m)
3	D	9.95	0.050	0.540
3.5	D	9.95	0.050	0.553
4.5	D	9.95	0.050	0.697
5	D	9.95	0.050	0.764
4.5	A	12.86	0.048	1.241
4.5	B	13.04	0.056	1.091
4.5	C	13.75	0.070	1.107

Después del análisis preliminar de sensibilidad de las variables de entrada y la calibración de sus valores, se obtuvo un desempeño óptimo del programa Flow 3D con los siguientes datos de entrada:

- 1 Se define la geometría que va a ser analizada, en nuestro caso va a ser un tramo del canal de laboratorio, de una longitud de 6m que incluye un paquete de sedimentos que tiene un volumen de 0.12m³, los cuales se colocaron en 4m a lo largo del canal, con 0.3 metros de ancho y 0.1 metros de altura, se optó por reducir el análisis a esta parte, ya que es la zona de interés para el estudio, la consideración de los tramos anterior y posterior del canal no aportan condiciones determinantes a la simulación y aumentan considerablemente el tiempo y costo de la simulación, además, se examinó la geometría con sus diferentes pendientes. (3, 3.5, 4, 4.5 y 5%)

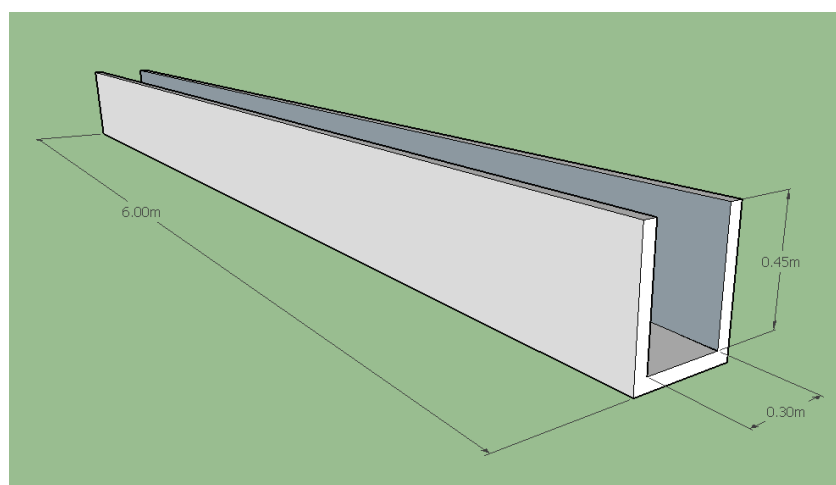


Figura 2 Geometría del canal a ser simulada.

- 2 Se realizó un mallado con elementos cúbicos, los cuales les corresponde un lado de 0.6 cm para cada celda, este valor fue fijado después de realizar un análisis de bondad con diferentes tamaños de mallas y varias pruebas de precisión, teniendo en cuenta que una malla más pequeña produce resultados más precisos, pero aumenta el tiempo de simulación considerablemente, además mallas demasiado finas producen problemas de estabilidad de la simulación.
- 3 Se definieron las condiciones de frontera para cada sección de la geometría, para el presente caso se fijó un volumen de entrada con un calado fijo para el ingreso de agua en el canal, tomando de datos las condiciones obtenidas en experimentación. Tanto para las paredes como para el fondo del canal se fijó las condiciones de pared, las cuales no permiten el ingreso de agua. Para la parte superior del canal se colocó una frontera de presión atmosférica y para el final del canal se colocó un límite de salida de flujo.

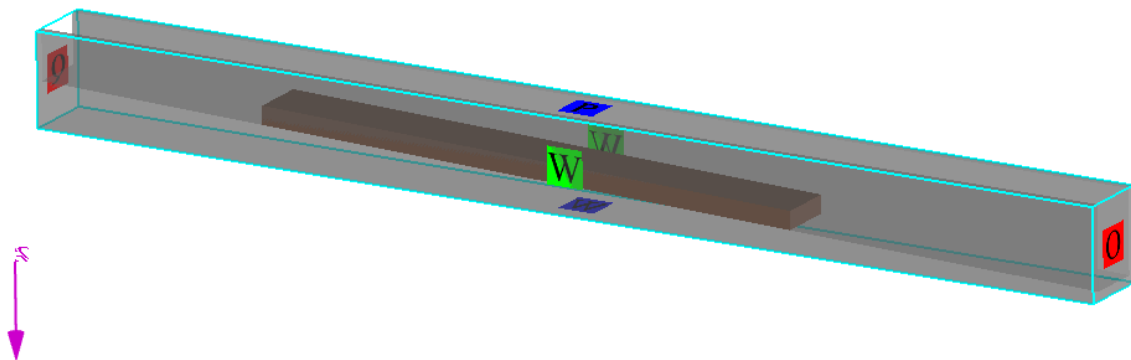


Figura 3 Condiciones de Frontera para el canal a ser simulado.



- 4 Para la asignación del valor de rugosidad se tomaron en cuenta los siguientes criterios:
 - 4.1 La rugosidad depende del material del lecho o del canal, en este caso es vidrio.
 - 4.2 Se ha comprobado que, cuando el nivel del agua presenta material grueso, el coeficiente de rugosidad aumenta apreciablemente.
 - 4.3 La rugosidad depende de las irregularidades del canal, de los cambios en la forma geométrica de la sección transversal, y de los cambios en las dimensiones de ésta.
 - 4.4 La rugosidad varía con los cambios en la pendiente longitudinal del canal.

Con lo que se estableció un valor de $1.5e-0.6$ m.

- 5 Se definieron las propiedades físicas del problema a ser analizado, en donde se precisó la gravedad como -9.81 m/s^2 , se activó el paquete para flujo viscoso y turbulento, en donde se seleccionó el modelo RNG para realizar este análisis, también se activó el paquete de sedimentos. El modelo (RNG) Renormalization-Group o **Grupo de Renormalización** fue escogido para el análisis de la turbulencia, ya que aplica métodos estadísticos a la derivación de las ecuaciones promediadas para cantidades de turbulencia, como la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación. En general, el modelo RNG tiene una aplicabilidad más amplia que el modelo estándar $k-\epsilon$ que se constituye en uno de los modelos de turbulencia más utilizados (Flow Science, 2014). En particular, se sabe que el modelo RNG describe flujos de turbulencia de baja intensidad y flujos que tienen regiones de cizalla fuertes con mayor precisión.



- 6 Para el paquete de sedimentos, se ingresaron los siguientes parámetros, los cuales se pueden cambiar según las condiciones específicas del fenómeno a analizar, existen valores definidos por defecto por el programa:
- 6.1 Tipos del Sedimento: Se ingresaron 4 tipos, cada tipo hace referencia al diámetro, ya que analizamos un mismo material.
- 6.2 Diámetro del Sedimento
- 6.3 Densidad del Sedimento (2650 kg/m^3)
- 6.4 Parámetro crítico de Shields, el cual puede ser constante, o puede recalcularse cada celda mediante la ecuación de Soulsby-Whitehouse.
- 6.5 Coeficiente de Entrada, el cual controla la velocidad a la que el sedimento se erosiona, por defecto el valor del programa es de 0.018, el cual es obtenido mediante las ecuaciones de Mastbergen y Von den Berg.
- 6.6 Coeficiente de carga de lecho, por defecto es 8, este valor es obtenido de un análisis entre 5 para transporte bajo y 13 para transporte alto de sedimento y es calculado mediante las ecuaciones de Meyer-Peter y Mueller.
- 6.7 Angulo de Reposo del material, el cual sirve para calcular el número crítico de shields fue de 42° , cuyo valor se obtuvo de análisis anteriores, donde este depende de la cantidad y diámetro de las canicas.

- 7 Para el proceso de la validación numérica de las simulaciones, se definieron tres puntos de control a lo largo del canal, en los cuales se verificaron las variaciones de la altura del paquete de sedimentos para el transcurso de toda la simulación. La finalidad del control de la variación de la altura de la capa de sedimentos, es la de determinar el tiempo en el cual esta se ha desplazado los 0.1 m iniciales, es decir cuando ya no se tiene altura de sedimento en los puntos de control. Los puntos se fijaron en la mitad del canal y se variaron los ejes x y z, dependiendo de la pendiente del canal.

Punto 1	Punto 2	Punto 3
X=1.25m	X = 3m	X=5.25m

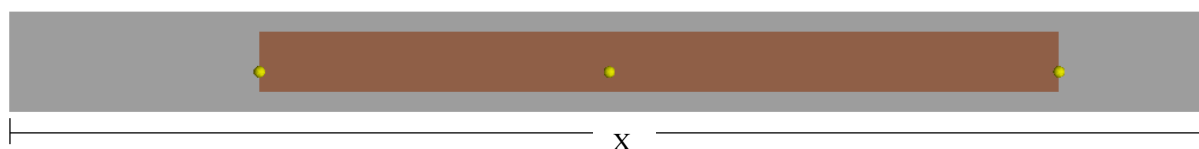


Figura 4 Puntos de Control del canal con vista z (+)

En la tabla 3 se muestran las coordenadas de los puntos seleccionados para el futuro análisis.

Tabla 3 Coordenadas en metros de los puntos de control.

Pendiente m (%)	Caso	Punto 1			Punto 2			Punto 3		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
3	D	1.25	0.20	0.19	3.00	0.20	0.14	5.25	0.20	0.07
3.5	D	1.25	0.20	0.22	3.00	0.20	0.16	5.25	0.20	0.08
4.5	D	1.25	0.20	0.26	3.00	0.20	0.19	5.25	0.20	0.08
5	D	1.25	0.20	0.29	3.00	0.20	0.20	5.25	0.20	0.09
4.5	A	1.25	0.20	0.26	3.00	0.20	0.19	5.25	0.20	0.08
4.5	B	1.25	0.20	0.26	3.00	0.20	0.19	5.25	0.20	0.08
4.5	C	1.25	0.20	0.26	3.00	0.20	0.19	5.25	0.20	0.08



El Punto 1 es el último tramo en quedar sin sedimento, por lo que se vuelve el punto a considerar para la determinación del tiempo en el que todo el paquete de sedimento es transportado fuera del dominio de simulación.

- 8 Por último, las tasas de transporte en ($\text{Kg/m}^3\text{s}$) para cada simulación se obtendrán a partir de los tiempos obtenidos en el modelo numérico, para la obtención de las mismas se usaran como datos principales el volumen de sedimentos, la densidad de los mismos y el ancho del canal.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Análisis de Bondad de la malla

Para la determinación del tamaño de malla óptima, se realizó un análisis de independencia de la malla de las 7 simulaciones antes mencionadas. En las Figuras 5,6,7,8,9,10 y 11, presentadas a continuación, se muestran los resultados de la comparación de las tasas de transporte para cada uno de los tamaños de malla utilizados, en las abscisas 0 se ha colocado los resultados medidos en laboratorio.

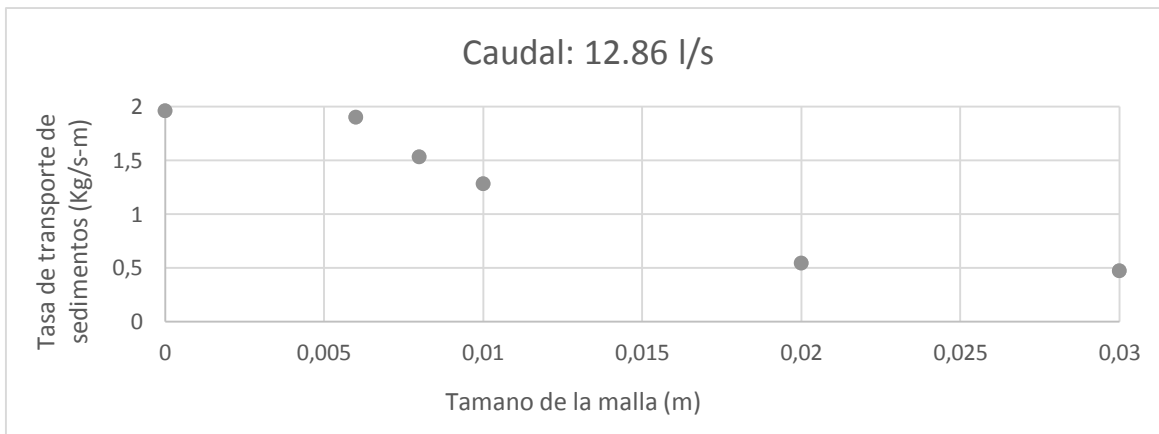


Figura 5 Simulación: Pendiente 4.5% Caso A

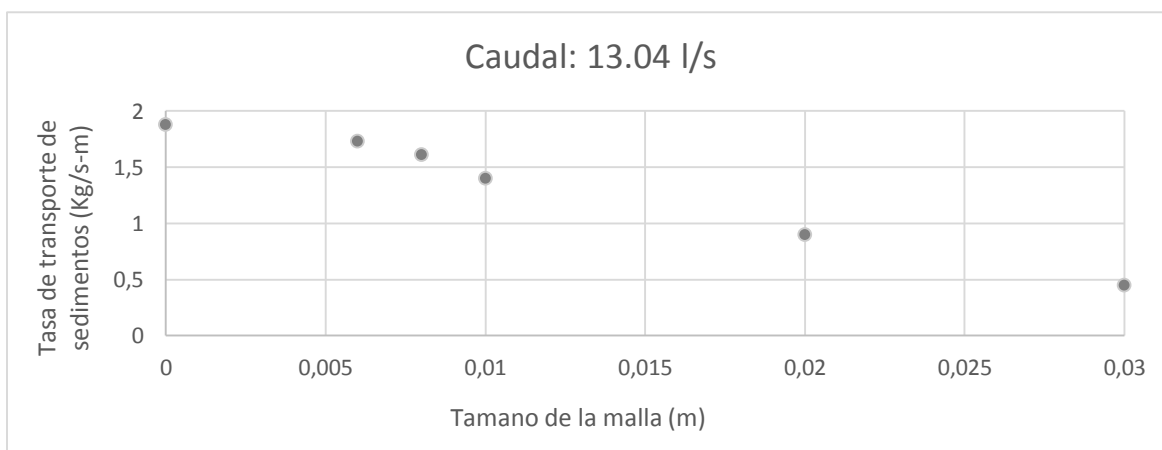


Figura 6 Simulación: Pendiente 4.5% Caso B

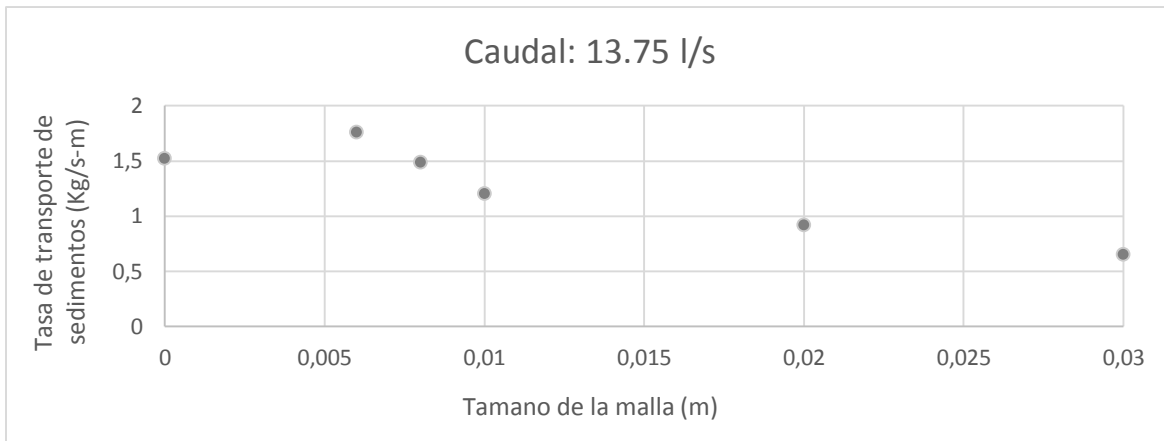


Figura 7 Simulación: Pendiente 4.5% Caso C

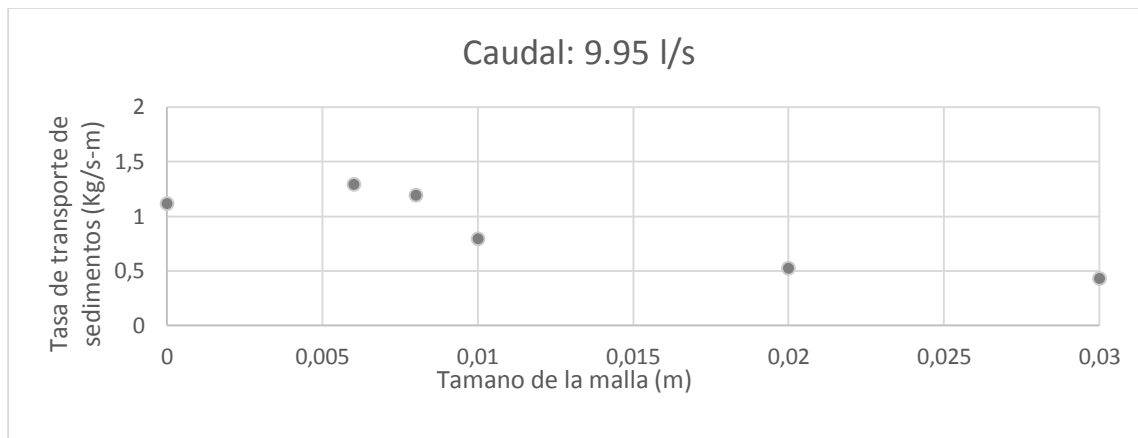


Figura 8 Simulación: Pendiente 3% Caso D

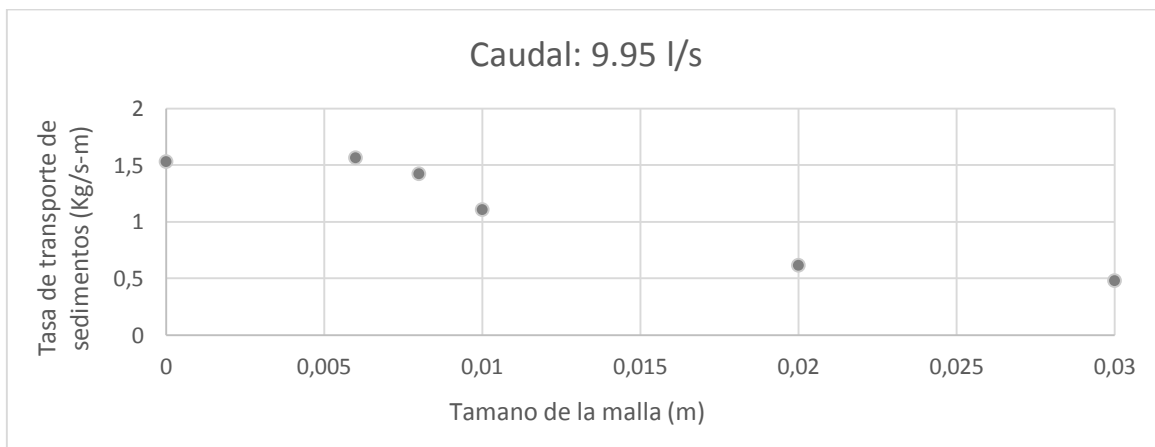


Figura 9 Simulación: Pendiente 3.5% Caso D

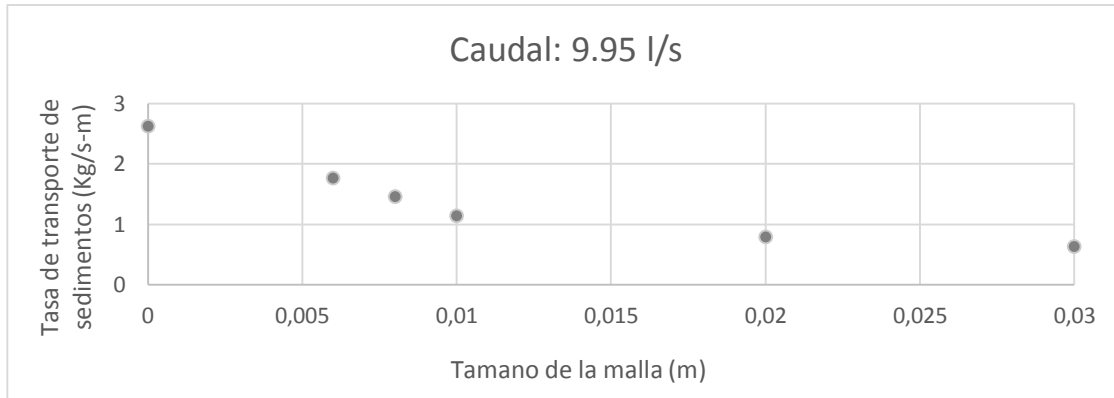


Figura 10 Simulación: Pendiente 4.5% Caso D

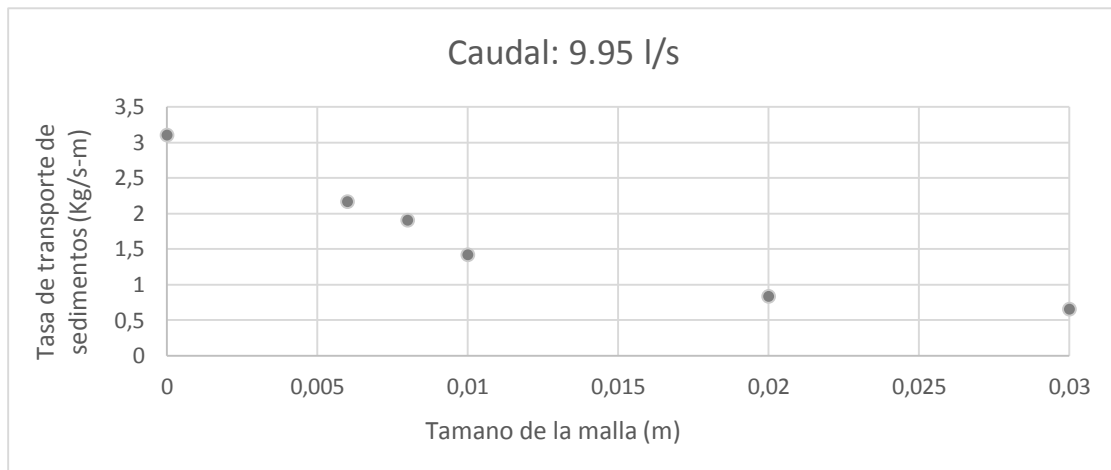


Figura 11 Simulación: Pendiente 5% Caso D

Al no poder comprobar la independencia de la malla (mismo valor del resultado para tres mallas consecutivamente más finas), ya que para mallas más finas existen problemas de estabilidad del modelo, se observa que el valor más cercano al valor experimental es el correspondiente a un tamaño de celda de 6 mm.

3.2 Variación de la altura neta del paquete de sedimentos

Para el análisis de la simulación numérica del transporte de sedimentos, Flow 3D proporciona una serie de parámetros, resultados de la simulación numérica del transporte de sedimento, parámetros que indican calados, densidades, velocidades, un parámetro de especial interés para el presente estudio es la variación de la altura neta del paquete de sedimentos, el cual reporta segundo a segundo (de la simulación) la interacción del fluido con la geometría del canal, es decir el avance del transporte del sedimento, de esta manera se obtienen los tiempos respectivos, para cada simulación, para el cual se produce el lavado total de sedimento, es decir, tiempo para el cual el fluido se llevaba por completo el volumen total del paquete de sedimento. En la figura 12 se muestra la variación de la altura del paquete de sedimento durante el tiempo de simulación que ocurre para el caso de la cuarta simulación que corresponde a una pendiente de fondo 5%, caudal líquido de 9.95l/s, calado de 0.50m, caso D y una malla de 6mm. Tal como se observa en la figura 12 para el tiempo de 44 segundos se presenta la estabilización del flujo a una altura de -0.1m.

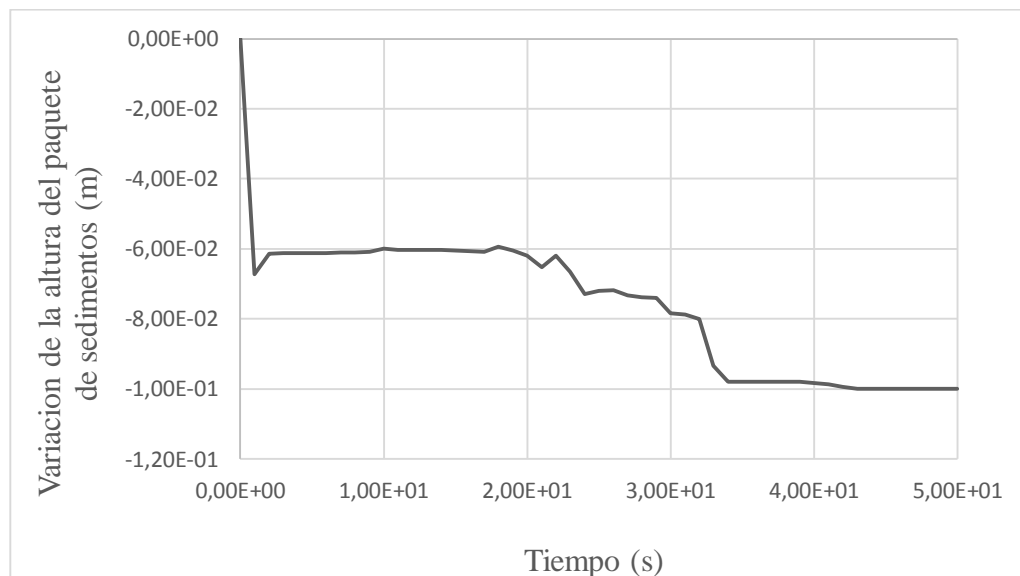


Figura 12 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 44s como se puede apreciar en el gráfico.

El eje de las ordenadas presenta valores en negativo, debido a que el programa toma como punto de referencia la altura inicial del paquete de sedimentos, así se puede observar la disminución de la altura del paquete de sedimentos durante el tiempo de simulación, hasta que alcanza su valor mínimo (44s).

Las siguientes representaciones muestran la variación del paquete de sedimentos en 3 dimensiones, en las Figuras 13, 15 y 17 se puede apreciar la variación del volumen de sedimentos a lo largo de la simulación, mientras que en las Figuras 14 y 16 se aprecia la variación de la altura del paquete de sedimentos mediante colores, donde el color azul nos indica la carencia de sedimento en esa zona (sedimento transportado). Adicionalmente en las Figuras 18, 19 y 20 se muestran los perfiles longitudinales correspondientes a las Figuras 13, 15 y 17 antes mencionadas de esta variación en dos dimensiones.

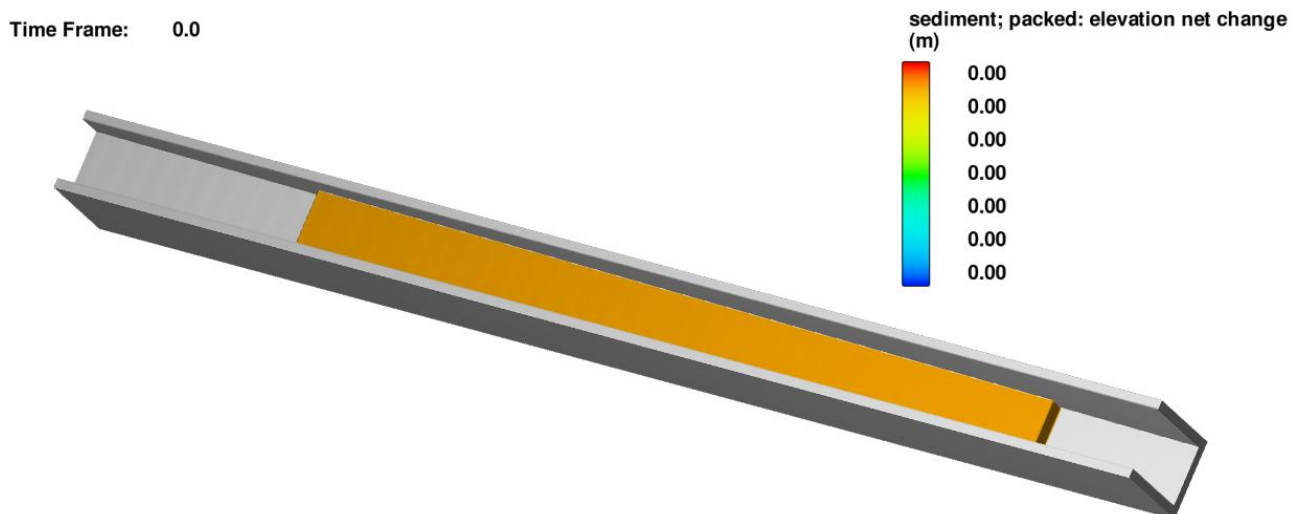


Figura 13 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.

Time Frame: 22.0

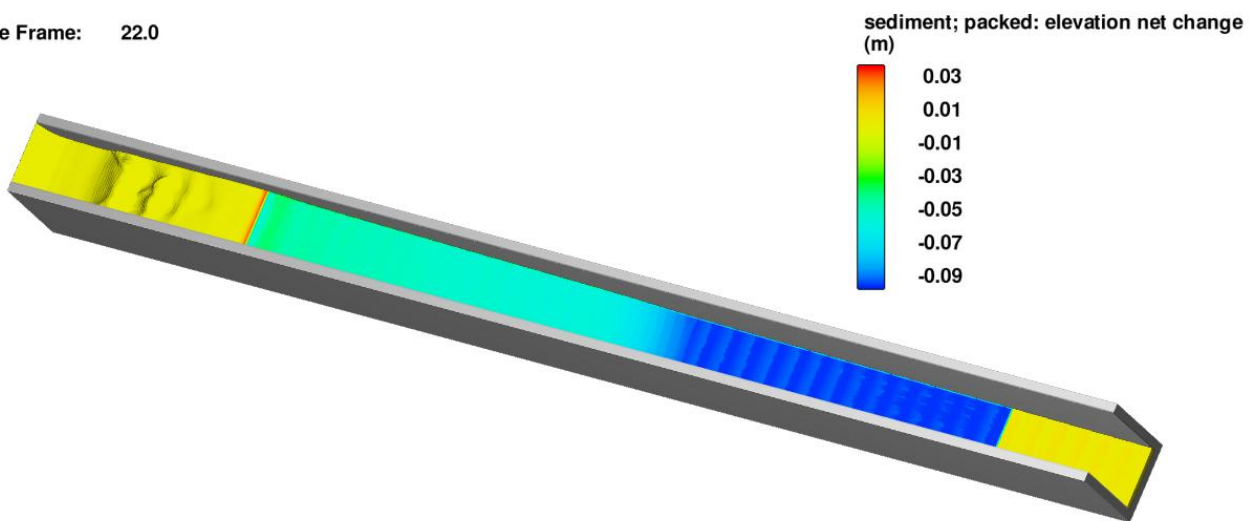


Figura 14 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 22s.

Time Frame: 22.0

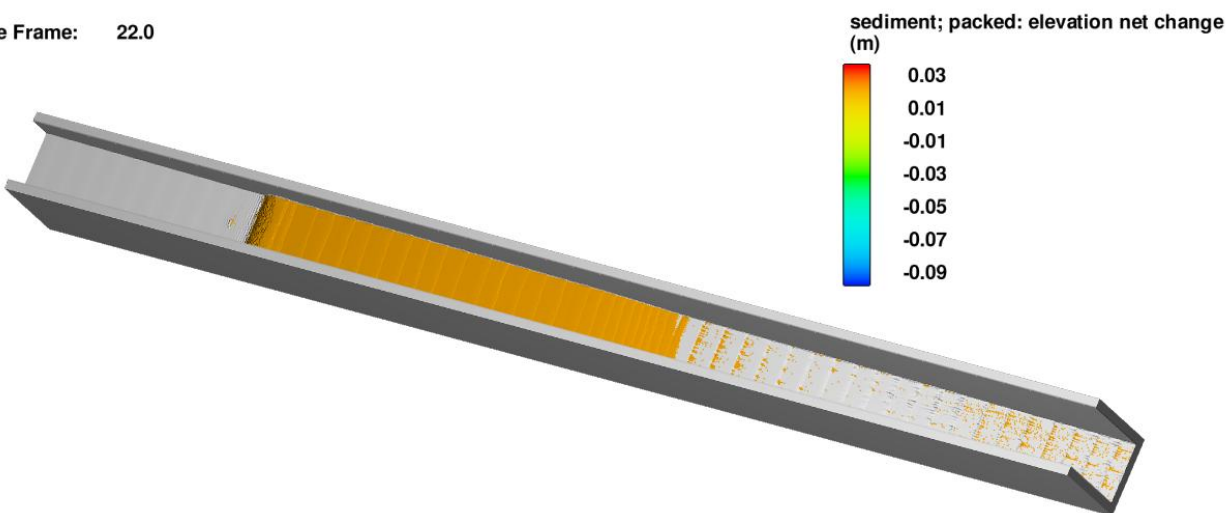


Figura 15 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 22 s.

Time Frame: 44.0

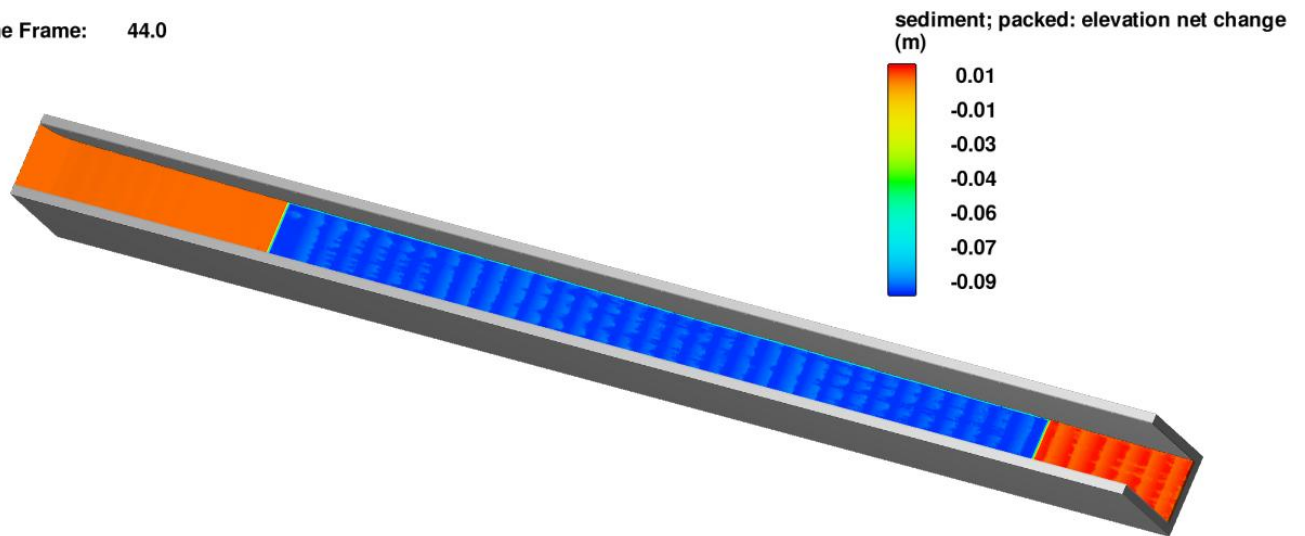


Figura 16 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 44s.

Time Frame: 44.0

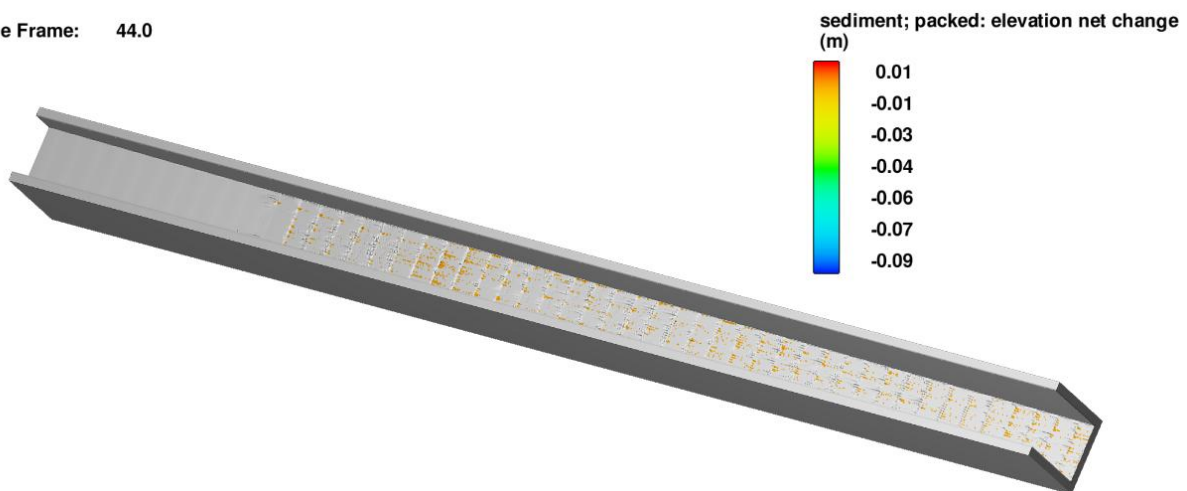
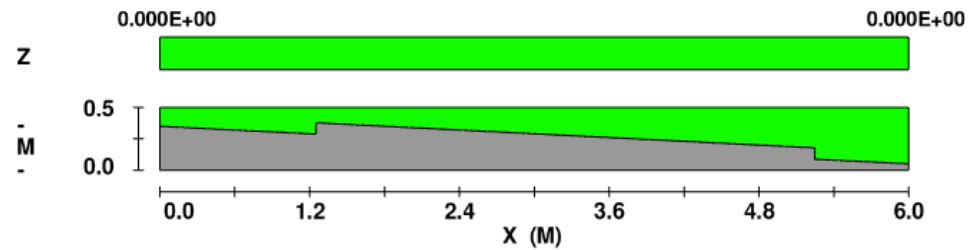
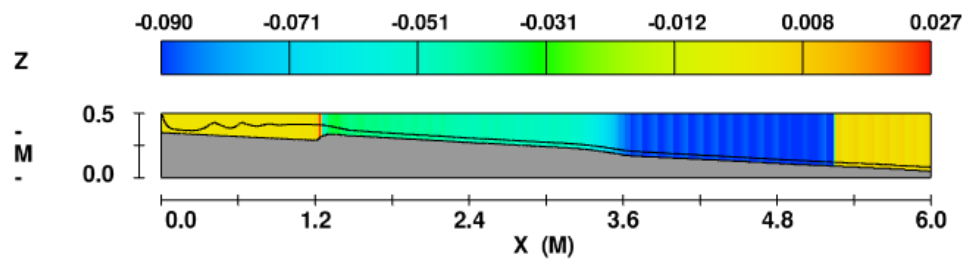


Figura 17 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 44s.



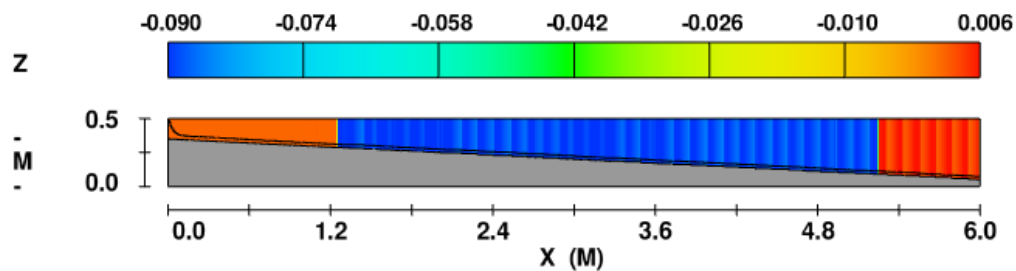
FLOW-3D t=0.0 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:58:23 11/01/2017 drhs hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 18 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación



FLOW-3D t=21.000050 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:58:23 11/01/2017 drhs hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 19 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 21 s.



FLOW-3D t=43.000210 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:58:23 11/01/2017 drhs hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 20 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a los 44s.

En las Figuras anteriores se observa una línea negra, la cual nos indica el perfil del flujo a lo largo del canal, donde se observa claramente que al ya haber sido transportado el sedimento, se estabiliza el flujo. En Anexos se muestran todos los resultados para cada simulación.



Se determinaron los tiempos de transporte del volumen total del paquete de sedimentos para todos los casos simulados, a continuación en la Tabla 4 se presentan estos tiempos de arrastre:

Tabla 4 Tiempos necesarios para el arrastre de 0.12 m³ de volumen de sedimento mediante la simulación numérica

Pendiente m (%)	Caso	Tiempo (s)
3	D	74
3.5	D	61
4.5	D	54
5	D	44
4.5	A	50
4.5	B	55
4.5	C	54

3.3 Tasas de Transporte

El parámetro de comparación y/o validación del modelo numérico es la tasa de transporte, las tasas de transporte medidas en laboratorio se comparan con las tasas resultantes de la simulación numérica para verificar la relación o el ajuste entre los dos resultados experimentales y numéricos. El programa Flow 3D no reporta directamente los valores de la tasa de transporte, por lo que un valor promedio de la tasa para toda la simulación se obtiene mediante la división del volumen total de sedimento transportado para el tiempo en que se produce dicho transporte. Adicionalmente, se realizó una comparación con las tasas de transporte teóricas con las ecuaciones de Meyer Peter & Muller, que como se había ya antes indicado es una de las ecuaciones con las que el programa Flow 3D determina el transporte de sedimento.



A continuación en la Tabla 5 se presentan los valores de las tasas de transporte de la simulación numérica, y sus respectivos valores teóricos y experimentales, considerando el valor de la tasa simulada numéricamente como el parámetro de comparación, se determinan los porcentajes de diferencia de las otras dos tasas (experimental y teórica). Se observa que el valor con máxima diferencia es la simulación con pendiente 4.5% caso D, en la cual el error es de un 33%, mientras que el la diferencia mínima es de un 2%, perteneciente a la simulación con pendiente del 3.5%, caso D. Esta gran variabilidad puede deberse a que la ecuación de Meyer Peter and Muller no fue diseñada para pendientes elevadas, además de ser un valor promedio de las tasas de transporte de sedimentos y a su vez la gran cantidad de parámetros iniciales como el coeficiente de entrada o el coeficiente de carga de lecho, que fueron tomados con el valor por defecto del programa, estos se deberían analizar a fondo.

Tabla 5 Comparación de las tasas de transporte del modelo en laboratorio, teórica, y de la simulación mediante Flow 3D.

Pendiente m (%)	Caso	Tasa Laboratorio (Kg/s - m)	Tasa Meyer Peter & Muller	Tasa Modelo Numérico	Error 1	Error 2
3	D	0.540	1.112	1.289	139%	16%
3.5	D	0.553	1.529	1.564	183%	2%
4.5	D	0.697	2.628	1.767	153%	33%
5	D	0.764	3.107	2.168	184%	30%
4.5	A	1.241	1.966	1.908	54%	3%
4.5	B	1.091	1.88	1.735	59%	8%
4.5	C	1.107	1.528	1.767	60%	16%

En la Figura 21 mostrada a continuación, se presenta una comparación gráfica entre las tasas de transporte resultado de la simulación, las teóricas y las experimentales, tal como se puede observar, las tasas de transporte del modelo numérico tienen una mayor similitud con las tasas de transporte teóricas, ya que son calculadas en base a la misma ecuación. Por otro lado, tal como se ha establecido en la literatura, cuando ecuaciones determinadas para condiciones de pendiente suave y sedimento fino son aplicadas a condiciones de mayor pendiente y mayor tamaño de material, dichas ecuaciones tienden a sobreestimar las tasas de transporte, particular que se puede observar en la Figura 21.

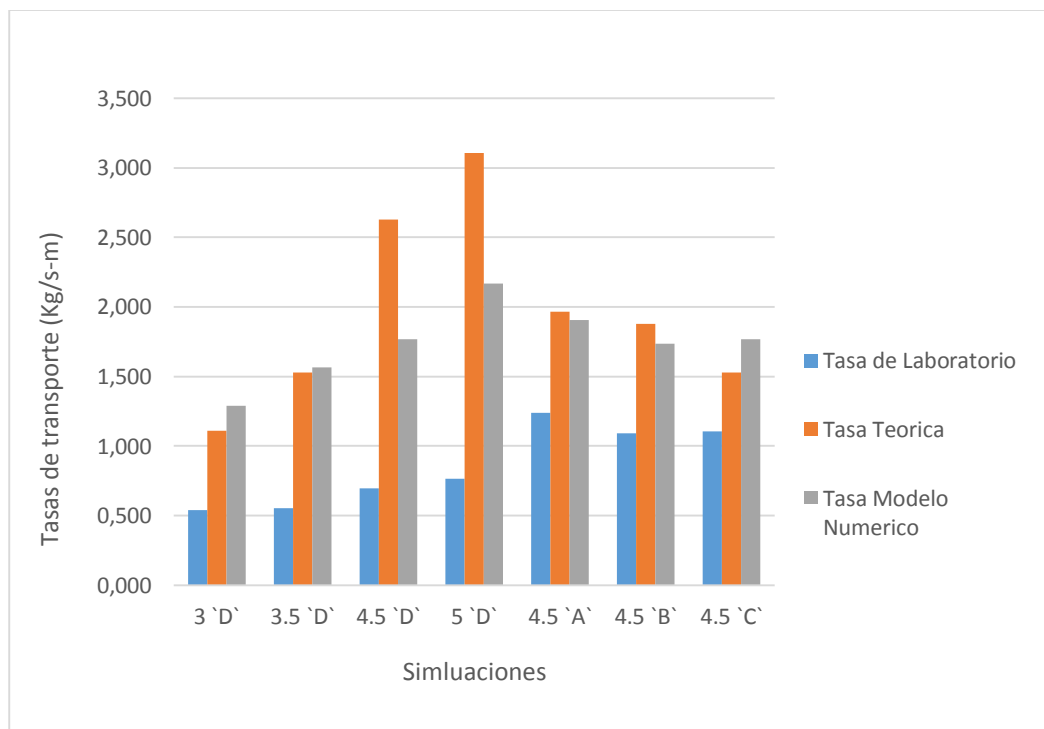


Figura 21 Diferencias entre tasas de transporte de sedimento con mallado de 6 mm.



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las simulaciones numéricas constituyen una herramienta poderosa de análisis de fenómenos físicos complejos, siempre que sean adecuadamente validadas. Tal como se detalla en la metodología del presente estudio, las simulaciones numéricas han sido llevadas a cabo con las condiciones y parámetros obtenidos experimentalmente en laboratorio, permitiendo así la simulación de ambientes controlados, de los cuales se dispone de datos medidos (reales) para la validación del modelo numérico. Las simulaciones desarrolladas que más se ajustan a las condiciones reales de campo son las obtenidas para el caso D, ya que este caso es el más representativo de condiciones naturales.
- Los resultados obtenidos de las 7 simulaciones numéricas muestran una gran variabilidad cuando se compara con los resultados experimentales, obteniéndose porcentajes de error que varían desde 54% al 184%, adicionalmente, cuando se comparan con los valores teóricos (obtenidos de la misma ecuación) se obtienen errores del 2 al 33% (ecuación de Meyer Peter & Muller).
- Con base en los resultados obtenidos se establece que la simulación numérica requiere de un análisis más detallado para establecer las posibles fuentes de error, parámetros como la resolución de la malla, y los parámetros de entrada del modelo pueden ser modificados para establecer su influencia en los valores finales de las tasas de transporte, sin embargo, se debe considerar que un análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada del modelo requiere un tiempo de simulación considerable, y una alta demanda de recursos sobre todo computacionales, una vez implementado el modelo (presente estudio) se puede desarrollar este análisis de sensibilidad con mayor facilidad (estudios futuros).



- Adicionalmente, se conoce que las condiciones de las ecuaciones teóricas utilizadas en la simulación numérica no se ajustan a las condiciones de la configuración experimental y que fueron simuladas en el modelo, hecho que puede ser el causante principal de las diferencias reportadas, sin embargo, se puede concluir que dichas diferencias son esperadas, debido a la diferencia de la naturaleza de las ecuaciones teóricas utilizadas para la simulación numérica y a las condiciones experimentales.
- De esta manera se establece, que la modelación numérica es una poderosa herramienta para desarrollar análisis de fenómenos complejos, sin embargo, se requiere de un proceso de calibración y validación para su utilización final como herramienta en la toma de decisiones. Aspectos principales a considerar son resolución de malla y las características del modelo de turbulencia que tienen alta influencia en la calidad de los resultados.
- Una vez que se haya logrado validar el modelo para las condiciones experimentales definidas en el presente estudio, un paso hacia el mejor entendimiento de los procesos de transporte de sedimento en cauces con pendientes elevadas y sedimento grueso es la consideración de material no uniforme y con una amplia distribución granulométrica.



5. BIBLIOGRAFIA

- Aguirre-Pe, J., Olivero, M. L., & Moncada, a. T. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. *Ingeniería Del Agua*, 7(4), 353–365. Retrieved from http://www.ingenieriadelagua.com/2004/bib_detalle.asp?Id=174
- Ardila M., J., Hincapié Z., D., & Casas M., J. (2015). Numerical models validation to correlations development for heat exchangers Validación de modelos numéricos durante el desarrollo de correlaciones para intercambiadores de calor, *I*, 164–168.
- Astudillo Matute, W. S., & Padilla Guarnizo, C. R. (2017). *ANÁLISIS DE TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO PARA PARTÍCULAS GRUESAS*.
- Calva Sarango, C. (2013). *Calibracion de una ecuacion para el transporte de sedimentos en la Cuenca El Limon, en l Rio Zamora*.
- Carling, P. A., & Reader, N. A. (1982). STRUCTURE , COMPOSITION AND BULK PROPERTIES OF UPLAND STREAM GRAVELS, 7, 349–365.
- Castillo, L. G., Alvarez, M. A., & Carrillo, J. M. (2011). Modelación numérica de sedimentación y lavado de sedimentos mediante “ flushing ” en el embalse Paute-Cardenillo, 1–8.
- Chanson, H. (2002). *Hidraulica del Flujo en canales abiertos*.
- D. José María Carrillo Sánchez. (2014). Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica.
- Dubuat, L. G. (1779). *Principes d’hydraulique et de pyrodynamique*. Paris, Francia.
- Faure, J., Buil, N., & Gay, B. (2004). 3-D Modeling of unsteady free-surface flow in open



channel, (November 2014), 37–41. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9728391>

Ferziger, J. H., & Milovan, P. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*.

Flow Science, I. (2014). FLOW-3D User Manual Release 11.0.3, 981.

Garcia Flores, M., & Maza Alvares, J. A. (2002). Origen y propiedades de los sedimentos.
Mexico.

Guarin Corredor, T. C. (2014). *Modelación del transporte de sedimentos en ríos. ejemplos de aplicación por el método de diferencias finitas en excel y matlab*.

Hidalgo, X., Castro, M., Casa, E., Dávila, D., & Ortega, P. (2015). Evaluación Sobre la
Incidencia de la Forma y Distribución de los Deflectores en la Geometría de los Cuencos al
Pie de Presas, 35(3), 3–9.

Lane, S. N., Bradbrook, K. ., Richards, K. ., Biron, P. ., & Roy, A. . (1999). The application of
computational fluid dynamics to natural river channels : three-dimensional versus two-
dimensional approaches.

López, R., Vericat, D., & Batalla, R. J. (2014). Evaluation of bed load transport formulae in a
large regulated gravel bed river : The lower Ebro (NE Iberian Peninsula), 510, 164–181.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.014>

Nils, B. Y., & Olsen, R. B. (2014). A THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR S
IMULATION OF S EDIMENT MOVEMENTS I N WATER, (June).

Papanicolaou, A. N., Bdour, A., & Wicklein, E. (2010). One-dimensional hydrodynamic /
sediment transport model applicable to steep mountain streams One-dimensional
hydrodynamic / sediment transport model applicable to steep mountain streams Modèle



Unidimensionnel hydrodynamique / transport de sediment applica, (June 2015), 37–41.

<https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641204>

Patankar, S. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.

Pierre, Y., & Julien. (2010). *Erosion and Sedimentation* (Second). Colorado.

RODRIGO ROY, Z. M. (2014). *MODELACIÓN NUMÉRICA 3D APLICADA AL DISEÑO DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS DE LA CENTRAL BAKER I, REGIÓN DE AYSÉN*.

Ruiz, M., & Narváez, M. (2015). Implementación Del Programa Flow 3D Para La Simulación Tridimensional Del Flujo En Una Estructura De Separación De Caudales, 180.

Salamea Guillen, T. A. (2015). *Modelamiento bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del río Calabí y obras hidráulicas*.

Shields, A. (1936). Anwendung der aehnlichkeitsmechanik der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Mitt. der Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Berlin, Alemania.

Tampier Brockhaus, G., & Salas Inzunza, M. (2011). Estudio y validacion de seakeeping de una embarcación mediante código de CFD abierto, (September).

Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M., & Burnham, J. (2014). Sedimentation Scour Model, (October).

6. ANEXOS

Simulación Pendiente 3 % Caso D

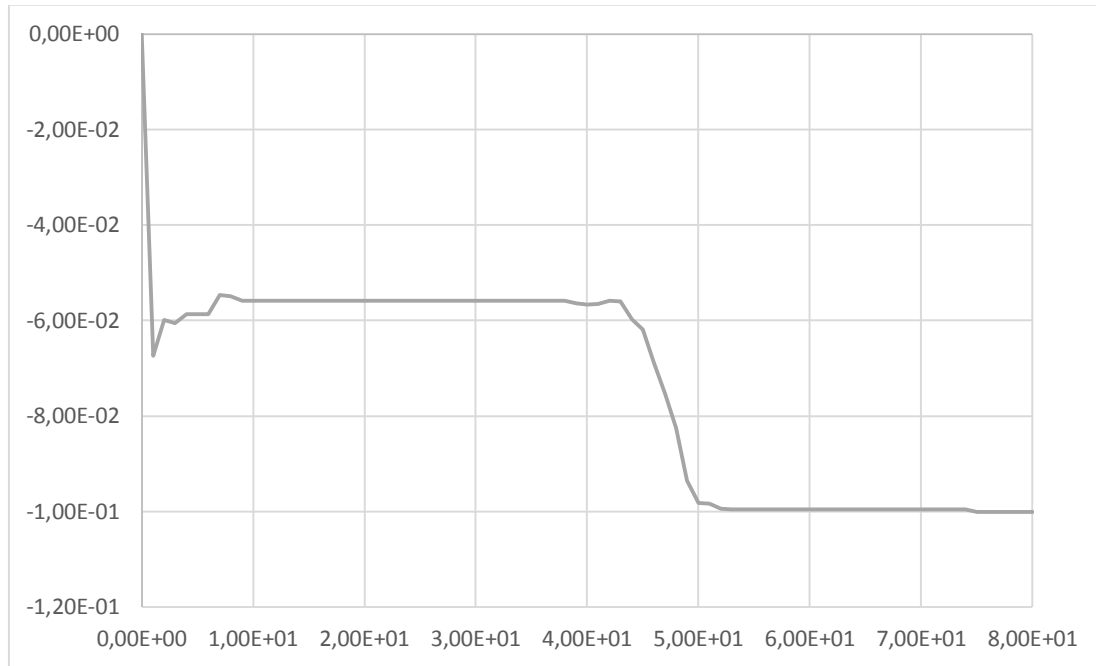


Figura 22 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 74s.

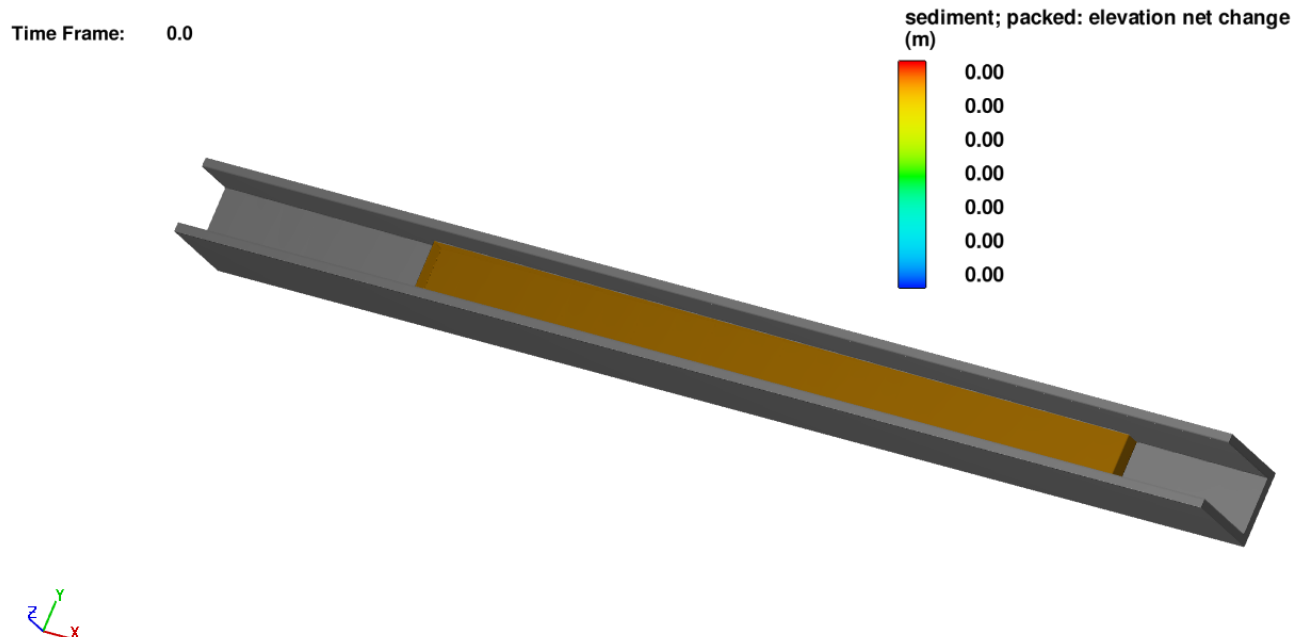


Figura 23 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s

Time Frame: 37.0

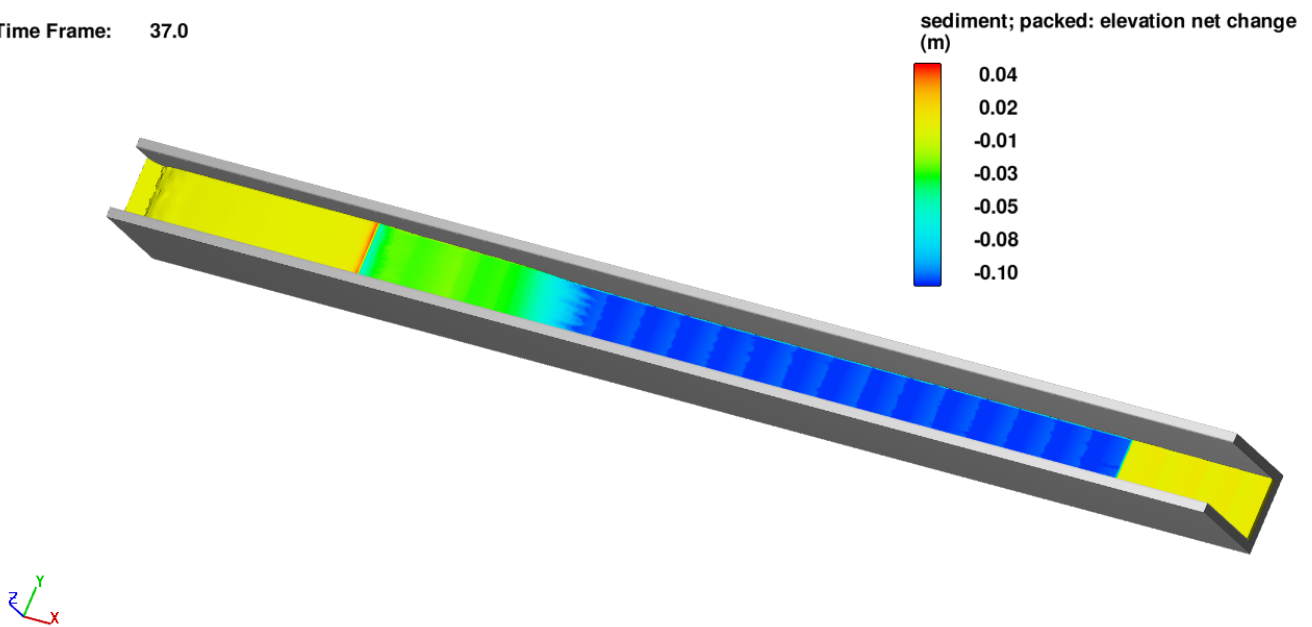


Figura 24 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 37s.

Time Frame: 37.0

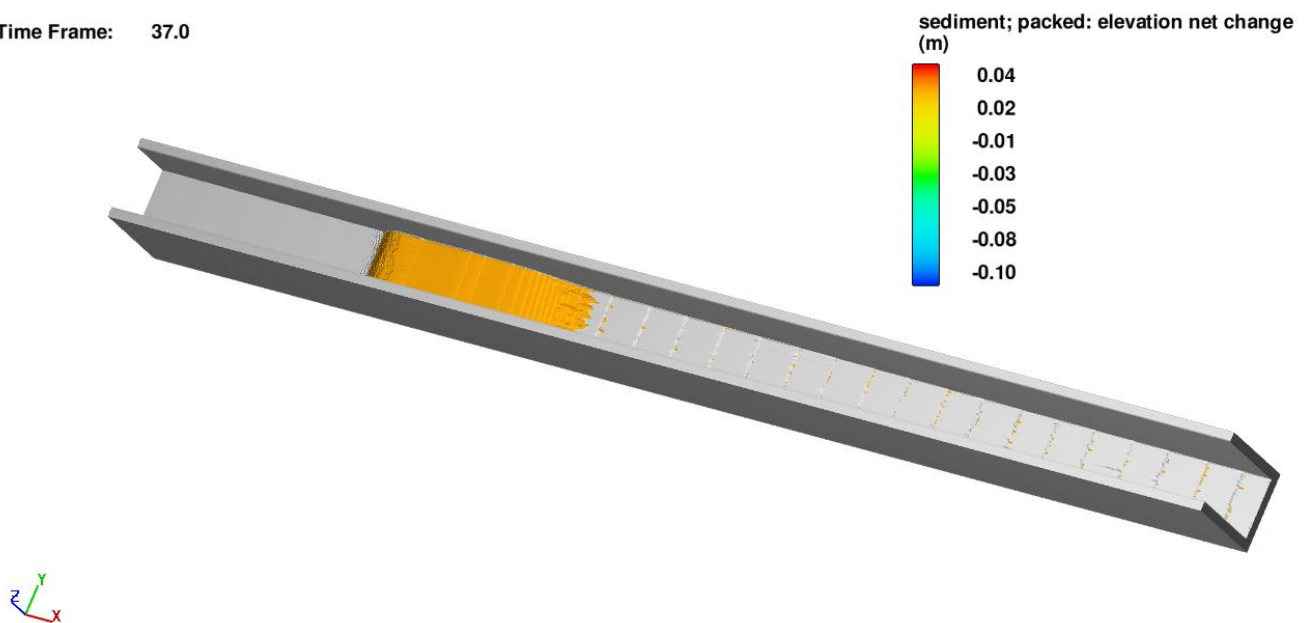


Figura 25 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 37 s.

Time Frame: 74.0

sediment; packed: elevation net change

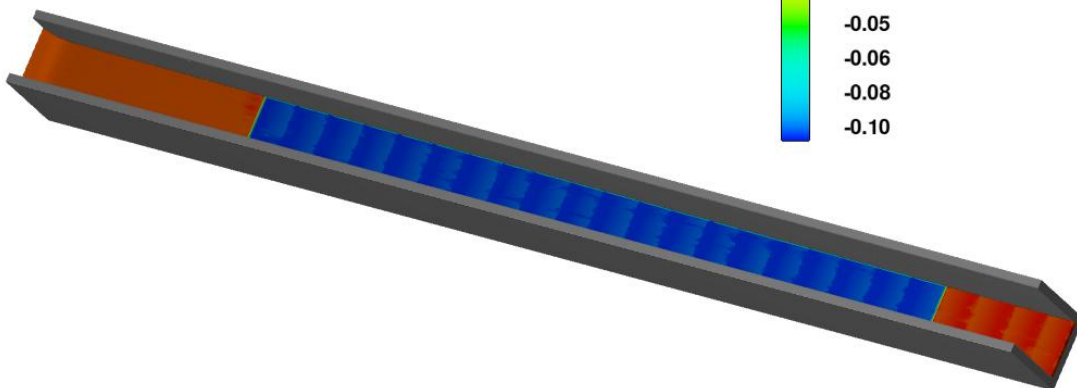
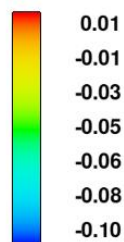


Figura 26 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 74s.

Time Frame: 74.0

sediment; packed: elevation net change

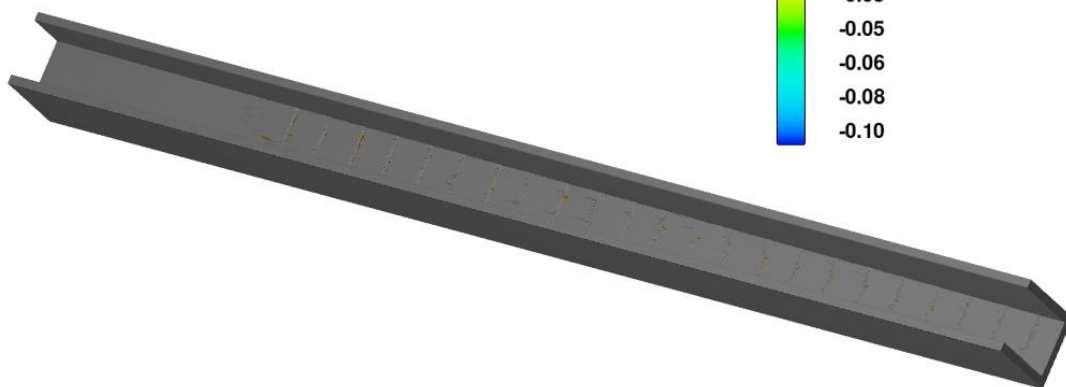
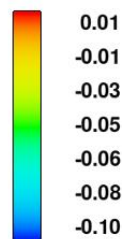
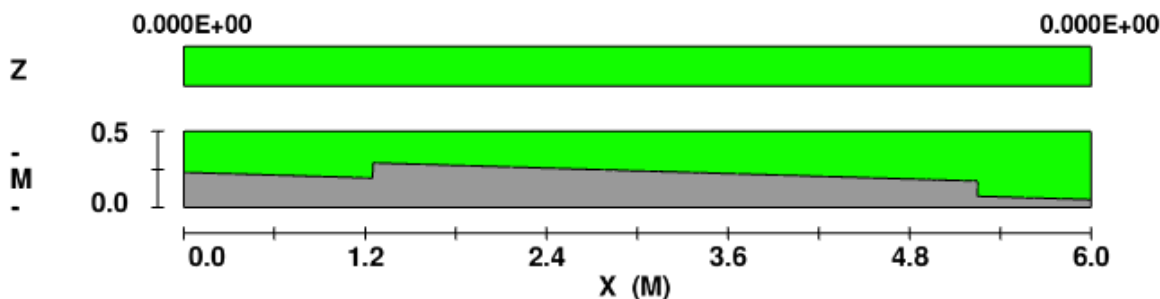
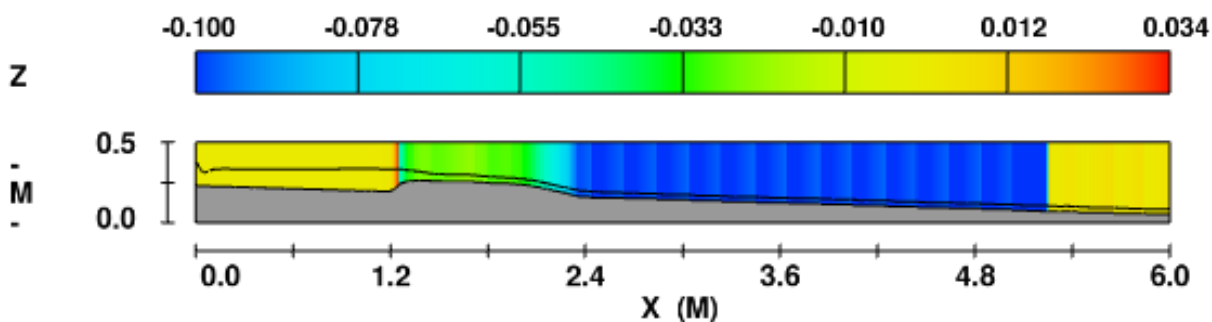


Figura 27 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 74 s.



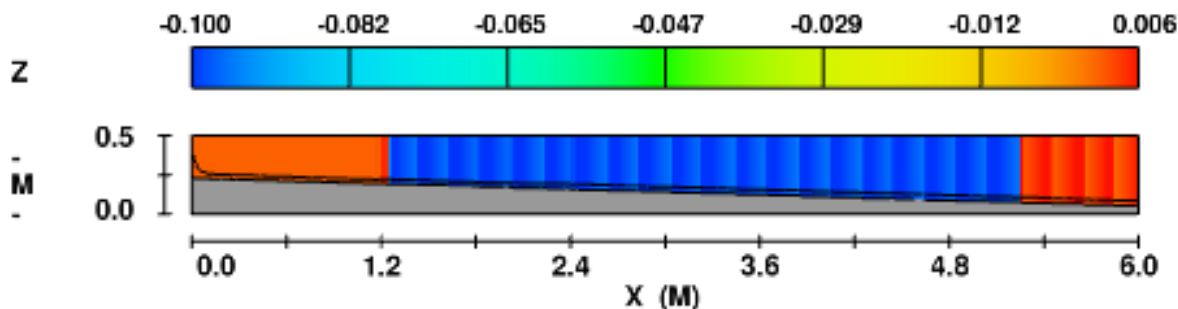
FLOW-3D t=0.0 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
13:23:27 11/05/2017 slam hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 28 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación



FLOW-3D t=37.000259 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
10:30:03 11/09/2017 rieo hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 29 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 37 s.



FLOW-3D t=54.000034 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
10:30:03 11/09/2017 rieo hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 30 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 74 s.

Simulación Pendiente 3.5 % Caso D

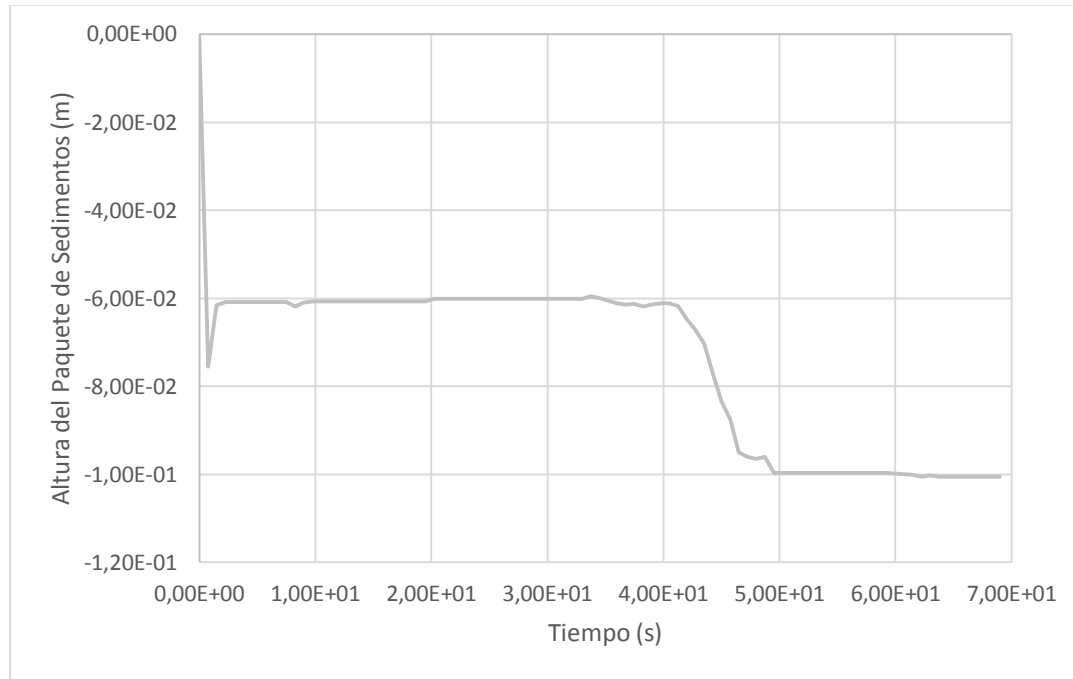


Figura 31 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 61s.

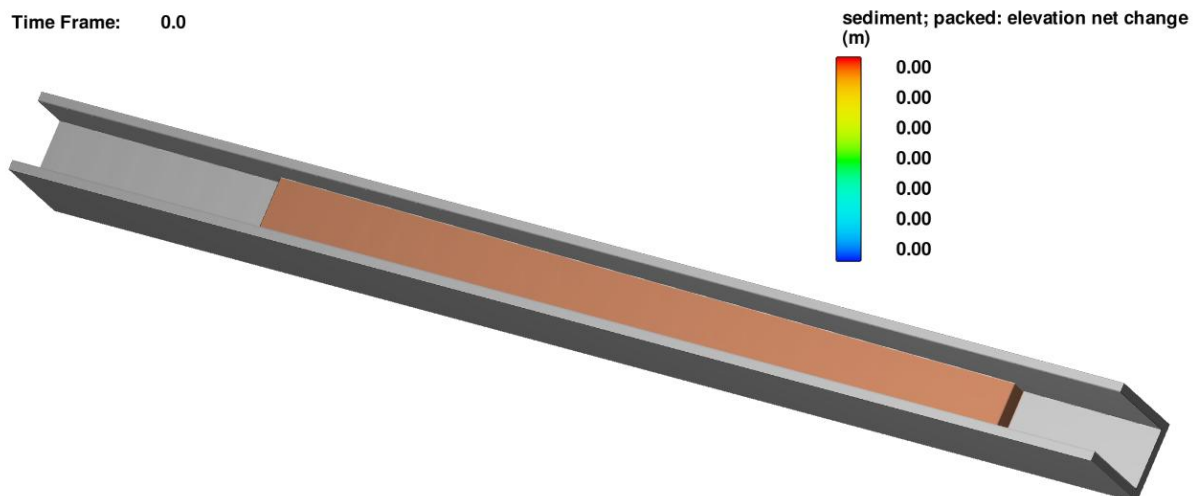


Figura 32 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.

Time Frame: 30.7

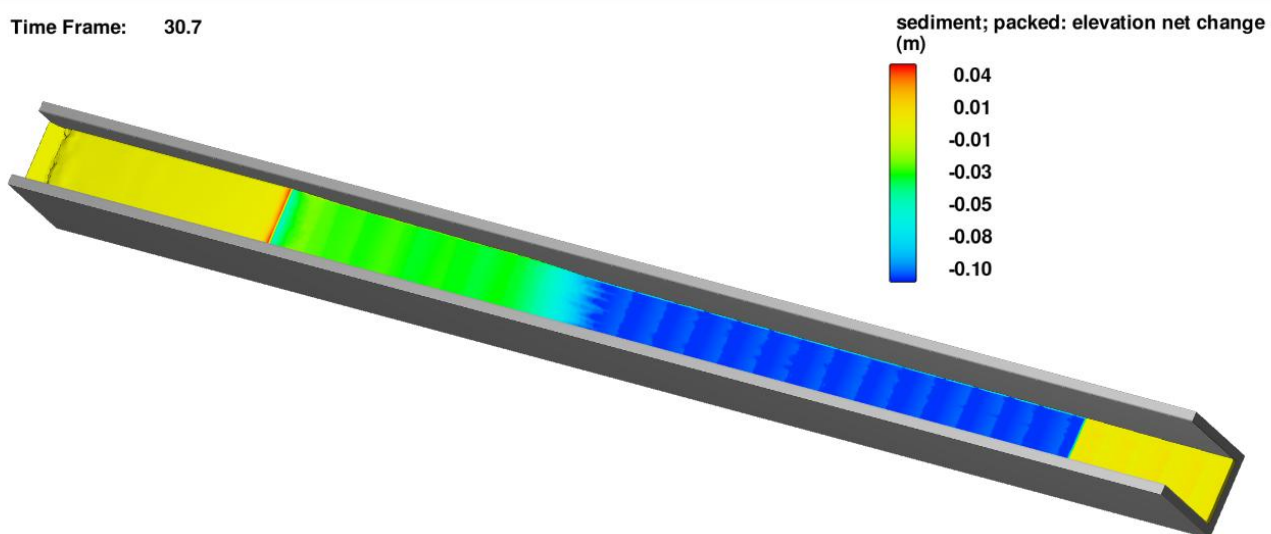


Figura 33 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 31s.

Time Frame: 30.7

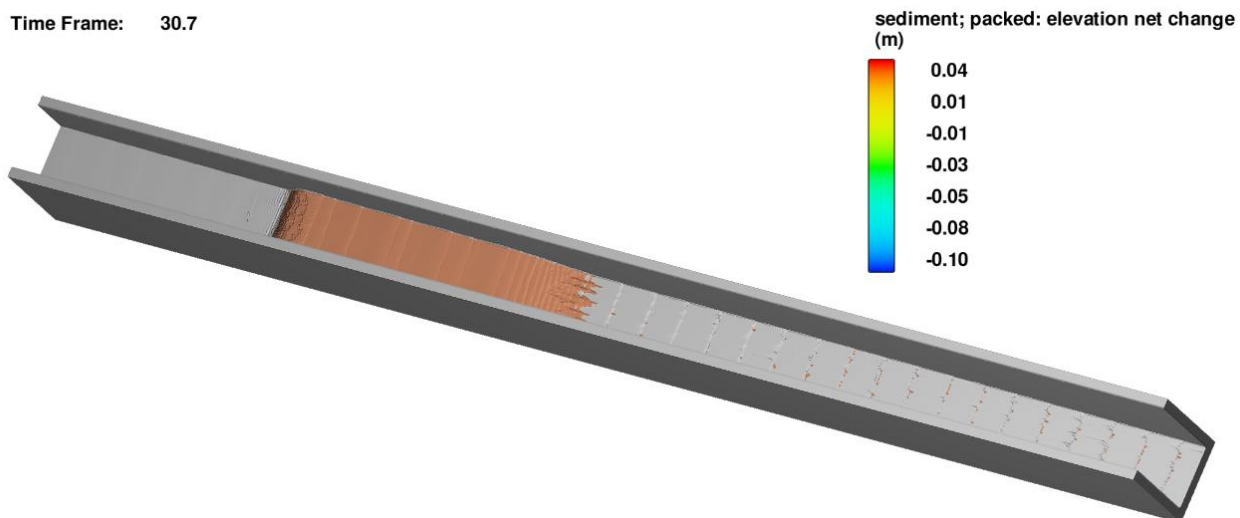


Figura 34 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 31 s.

Time Frame: 60.7

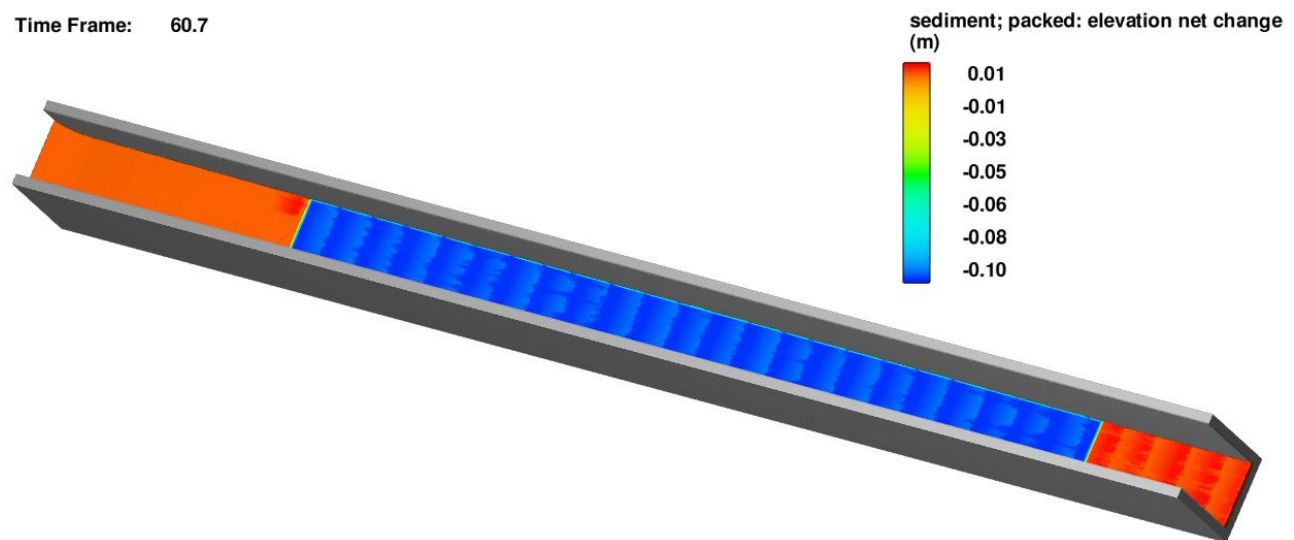


Figura 35 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 61s.

Time Frame: 60.7

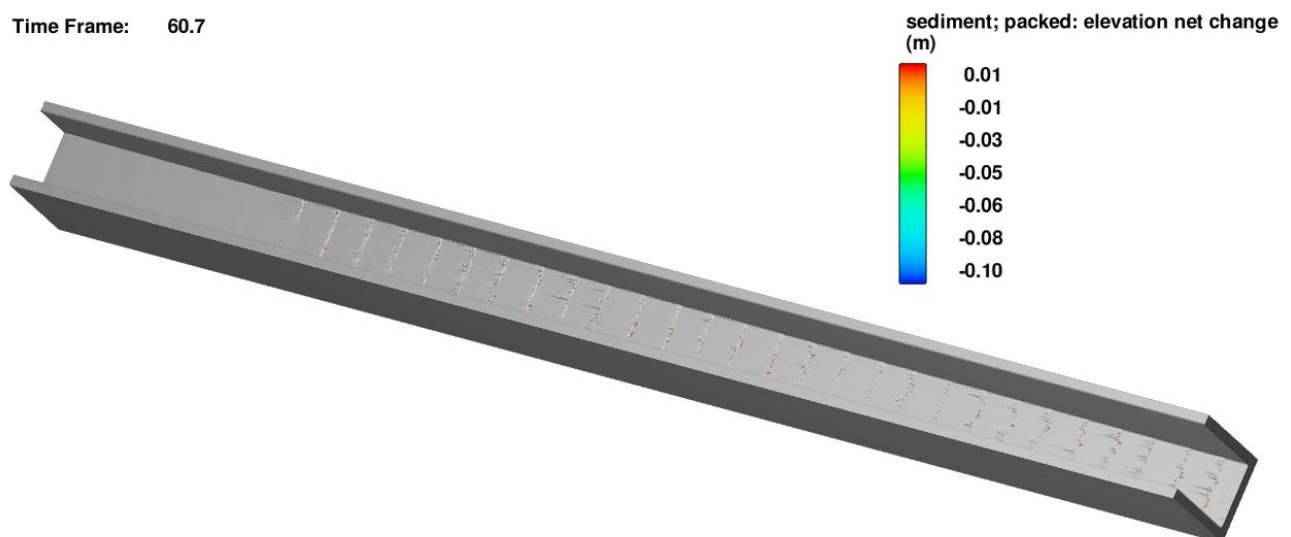
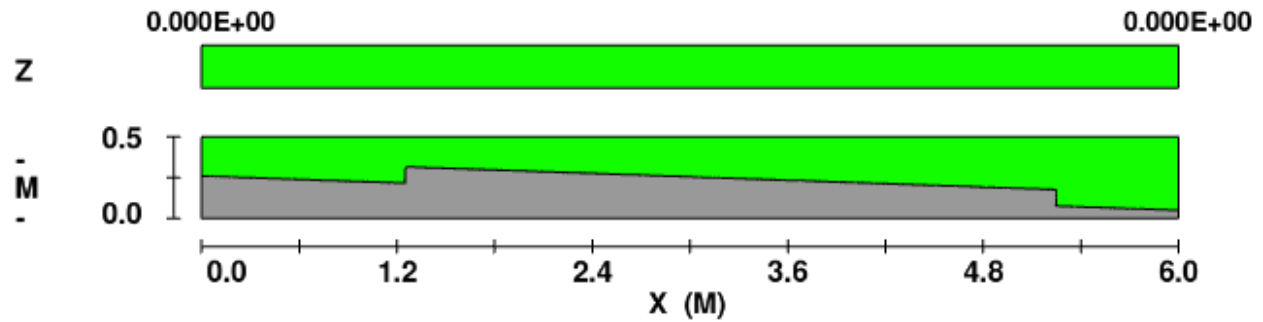
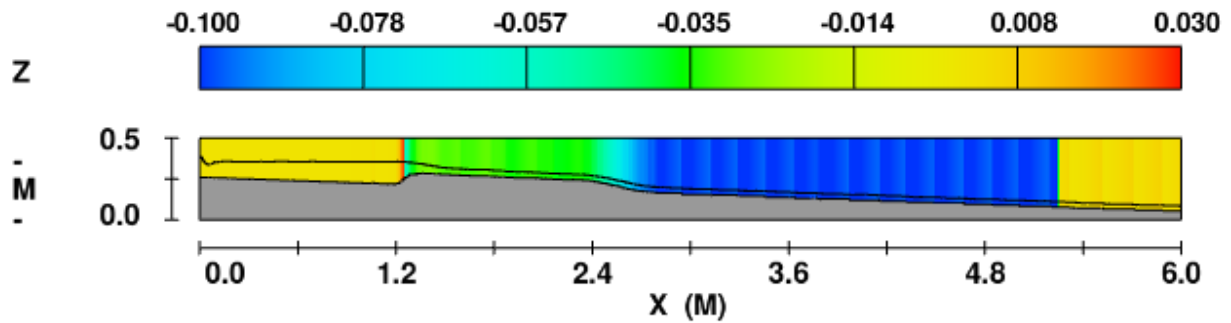


Figura 36 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 61 s.



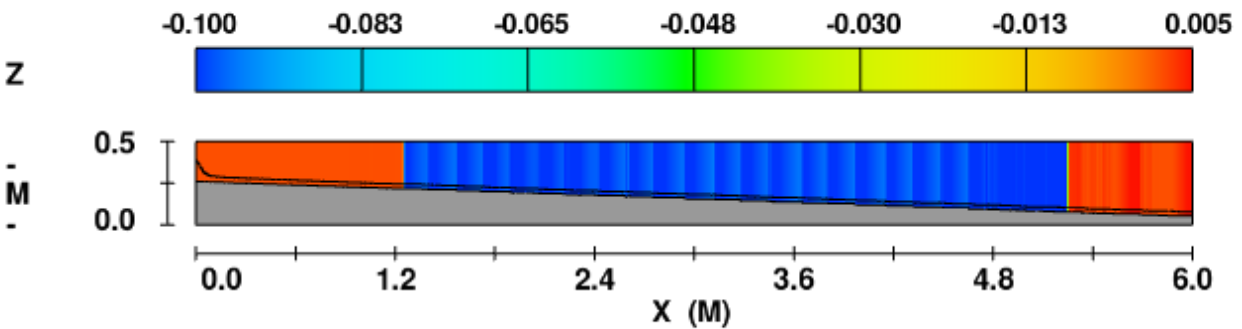
FLOW-3D t=0.0 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:57:43 11/01/2017 awhy hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 37 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.



FLOW-3D t=31.500105 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:57:43 11/01/2017 awhy hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 38 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 31 s.



FLOW-3D t=60.749687 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:57:43 11/01/2017 awhy hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 39 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 61 s.

Simulación Pendiente 4.5% Caso D

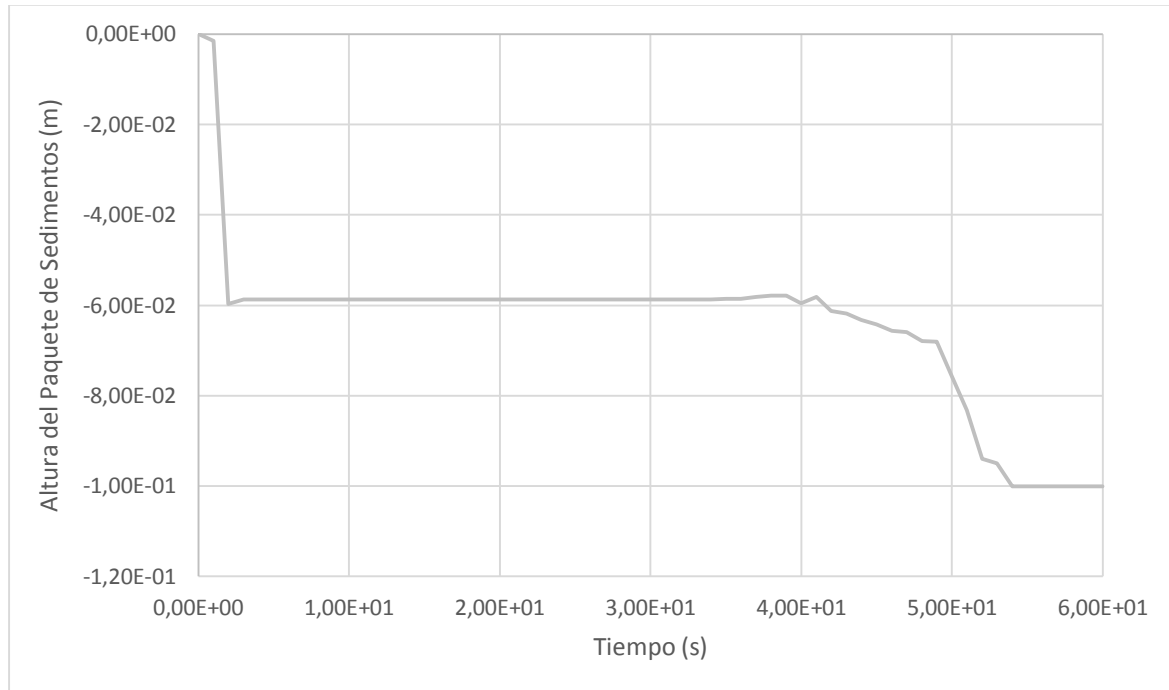


Figura 40 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 54s.

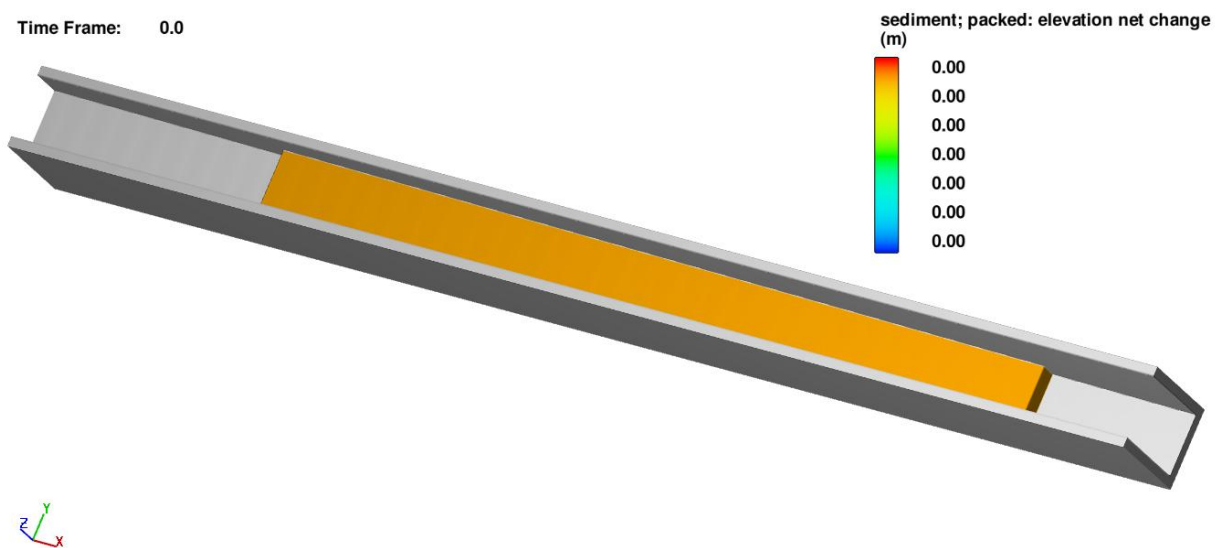


Figura 41 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.

Time Frame: 27.0

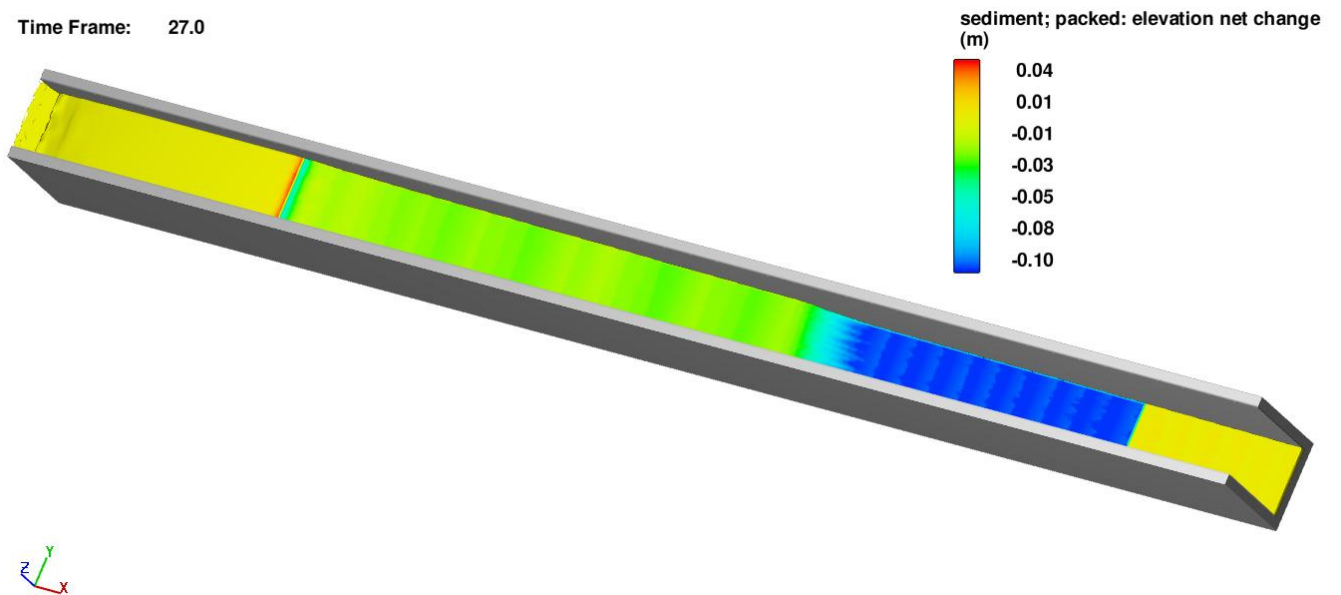


Figura 42 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 27s.

Time Frame: 27.0

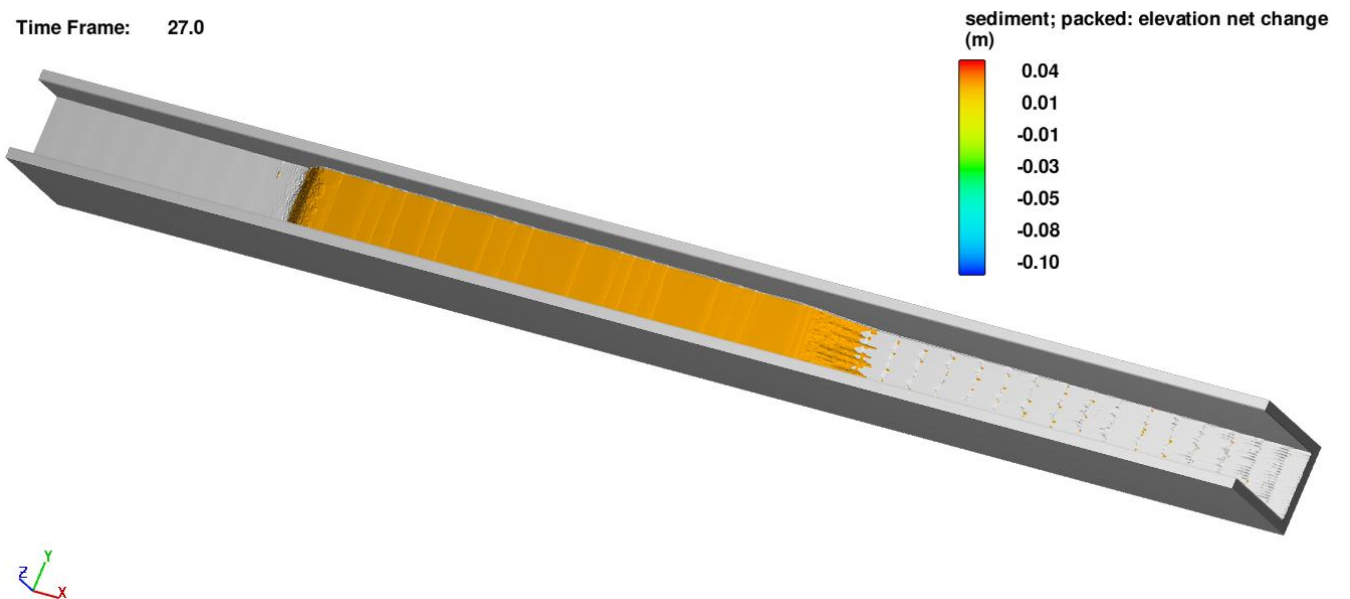


Figura 43 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 27s.

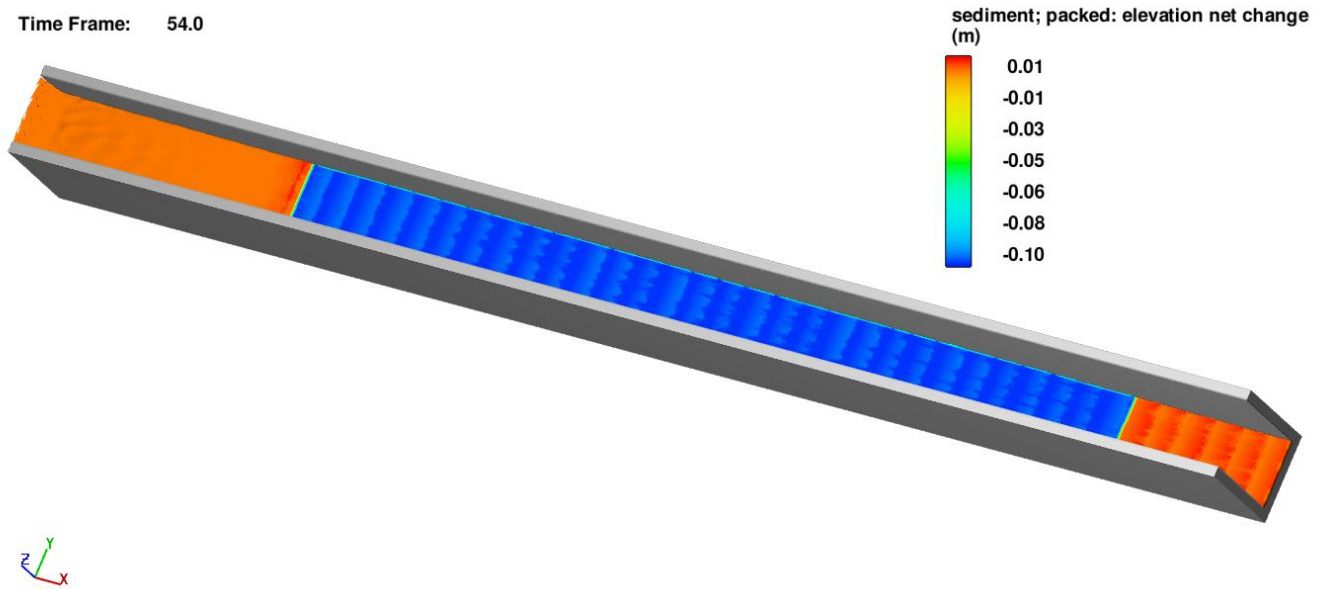


Figura 44 Figura 42 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 54s.

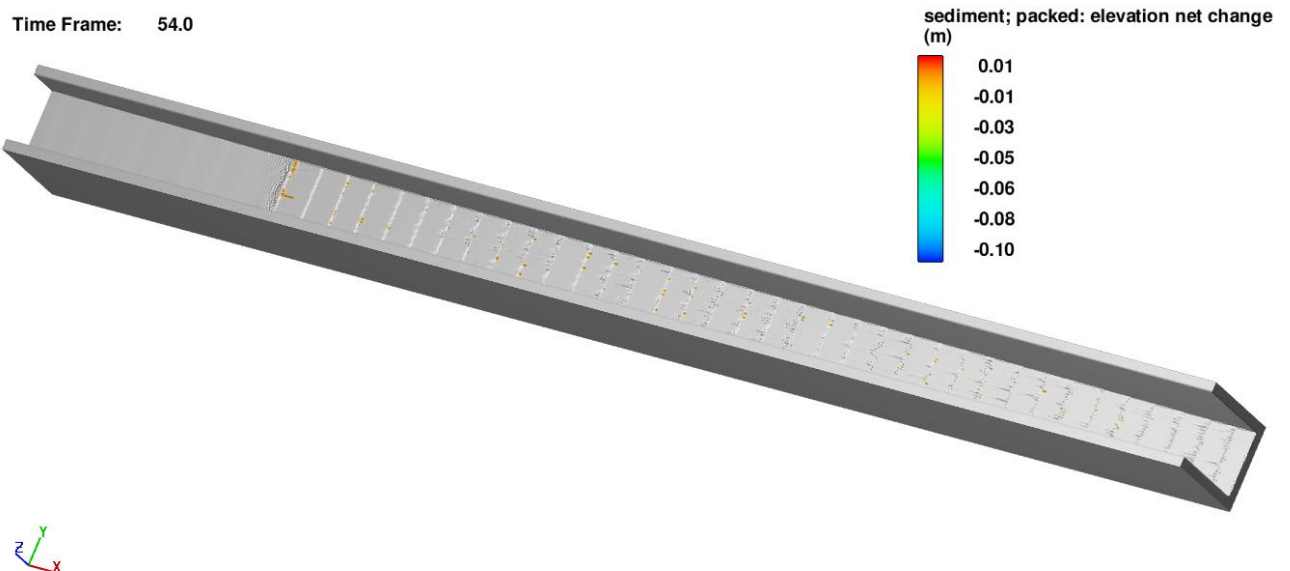
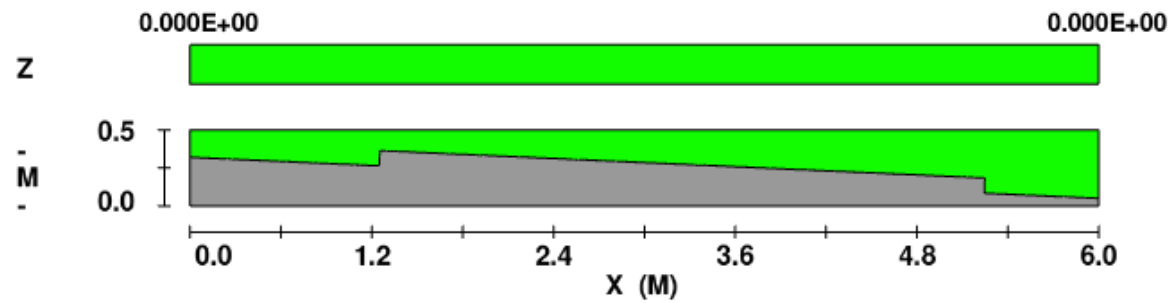
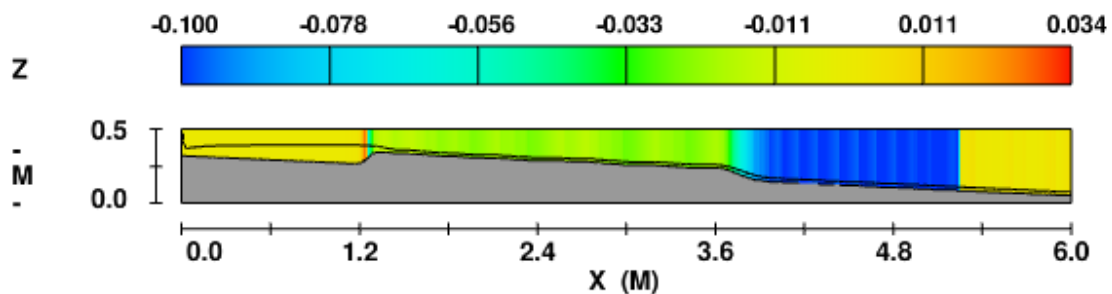


Figura 45 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 54 s.



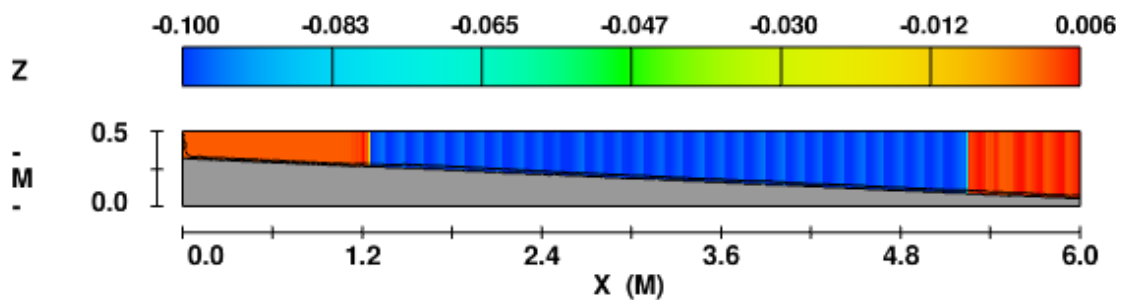
FLOW-3D t=0.0 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:52:53 11/01/2017 ybvm hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 46 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.



FLOW-3D t=26.999914 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:52:53 11/01/2017 ybvm hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 47 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 27 s.



FLOW-3D t=53.999859 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
17:52:53 11/01/2017 ybvm hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 48 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 54 s.

Simulación Pendiente 4.5% Caso A

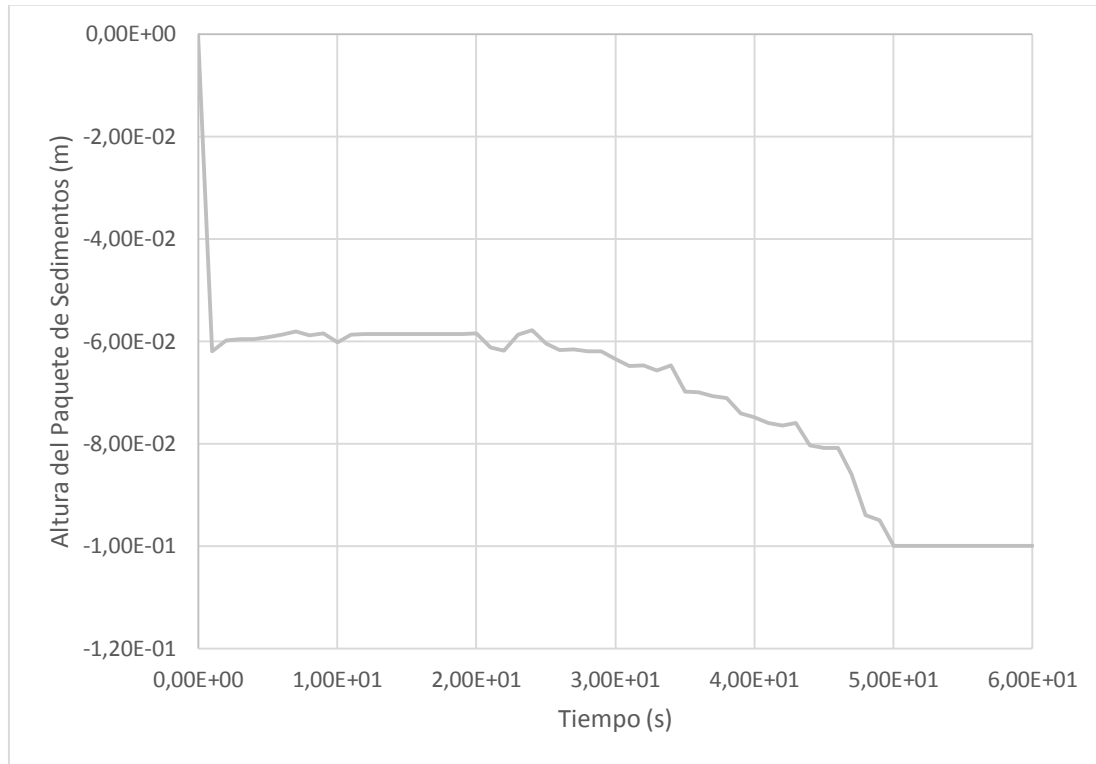


Figura 49 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 50s.

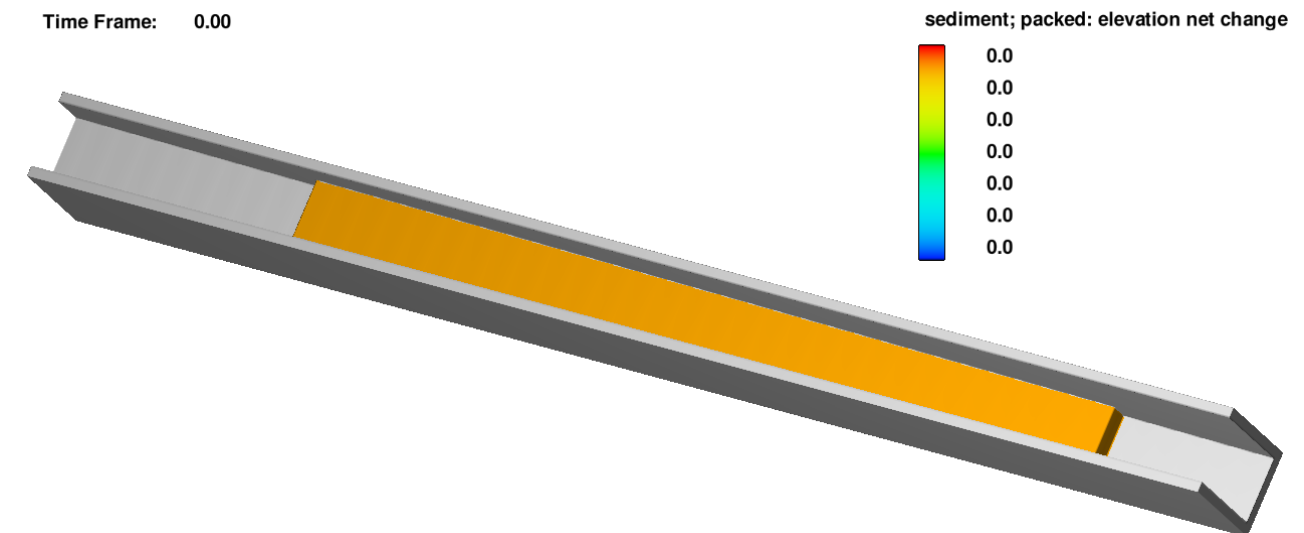


Figura 50 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.

Time Frame: 25.00

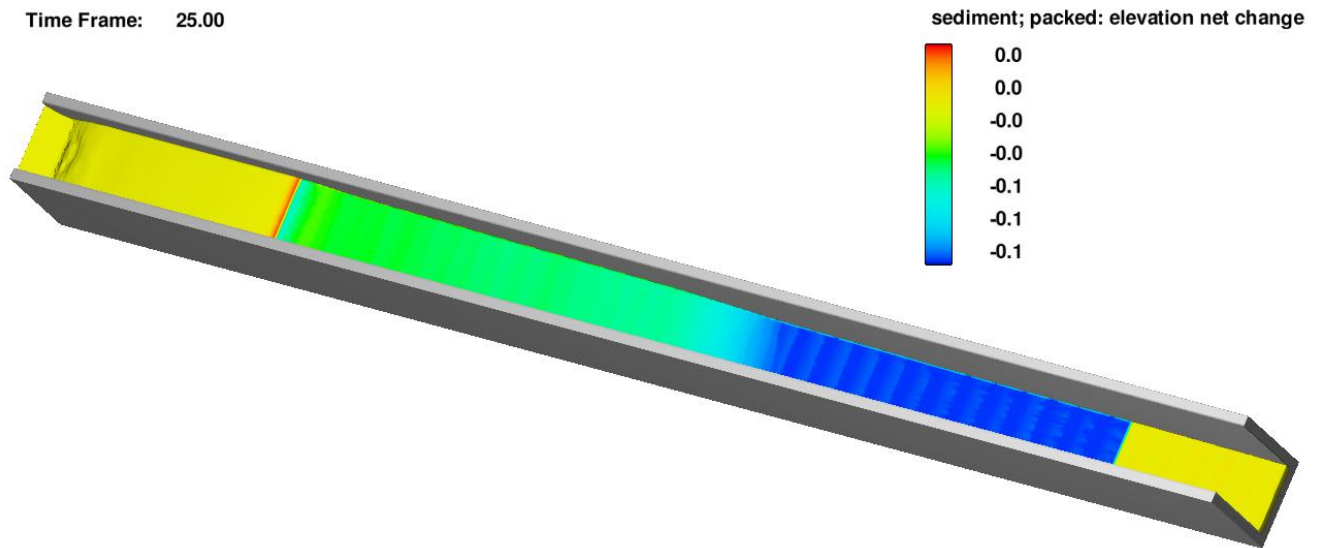


Figura 51 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 25s.

Time Frame: 25.00

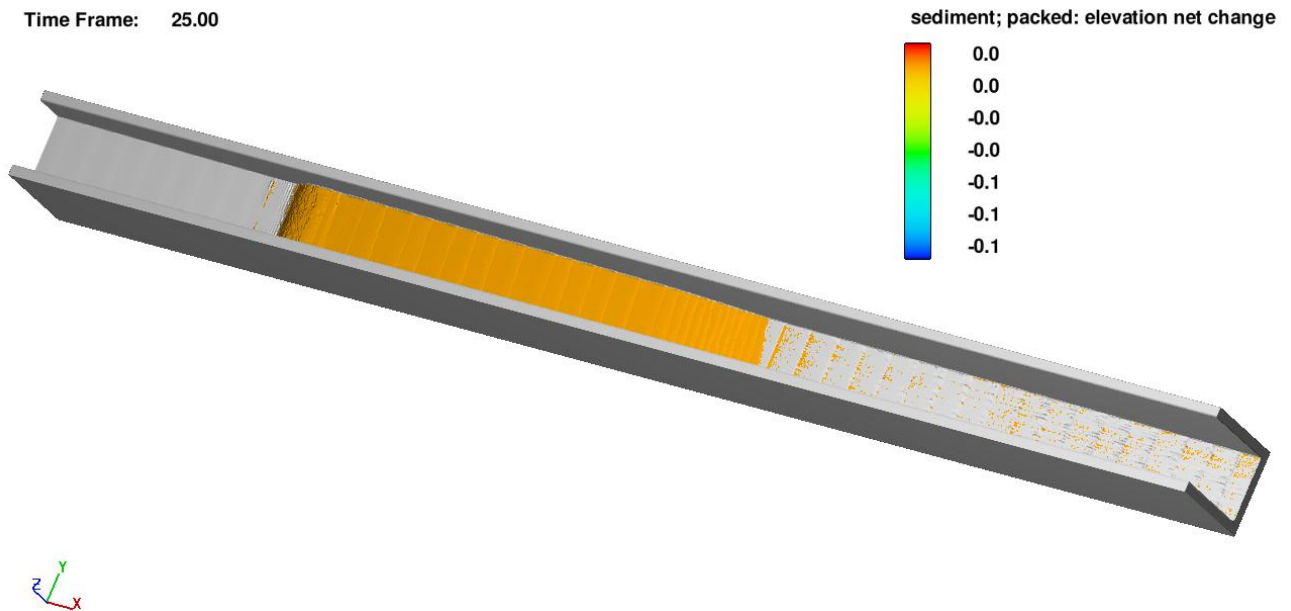


Figura 52 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 25 s.

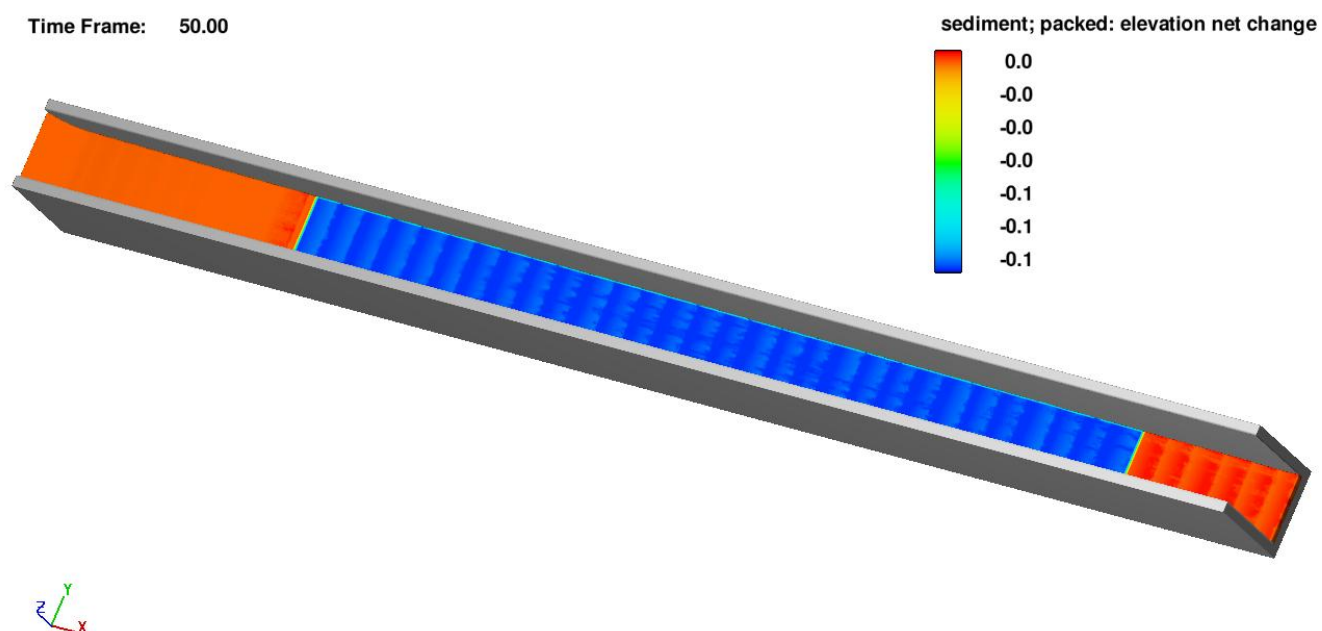


Figura 53 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 50s.

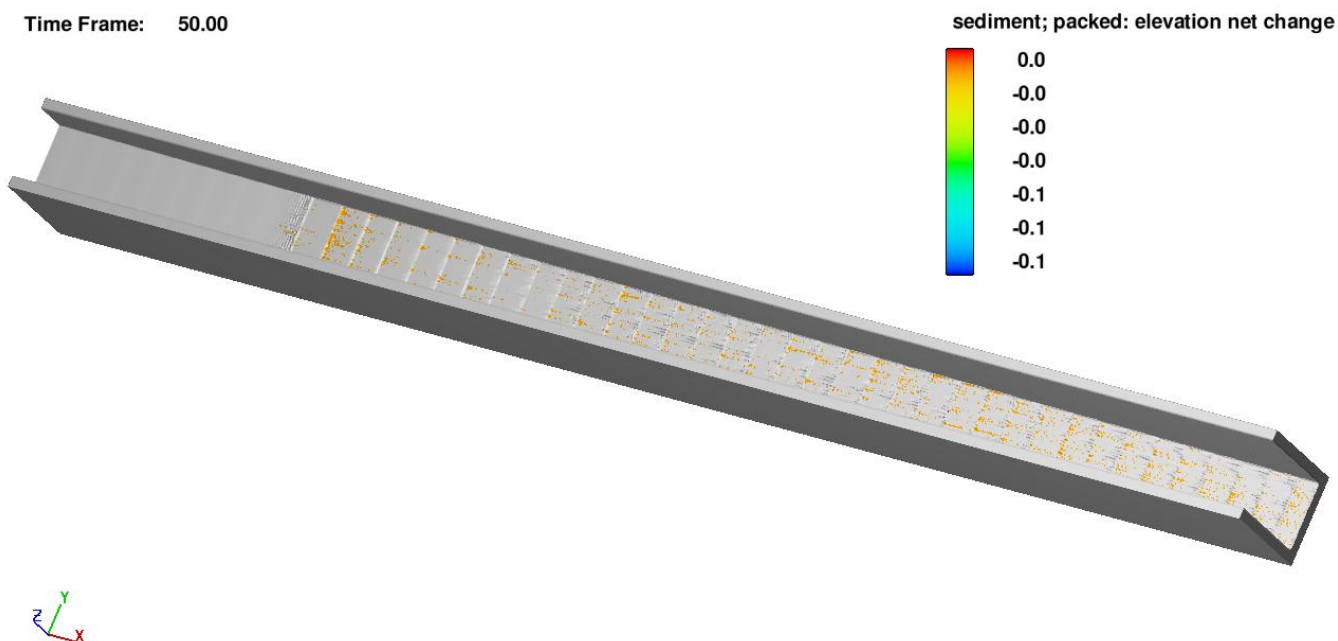


Figura 54 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 50 s.

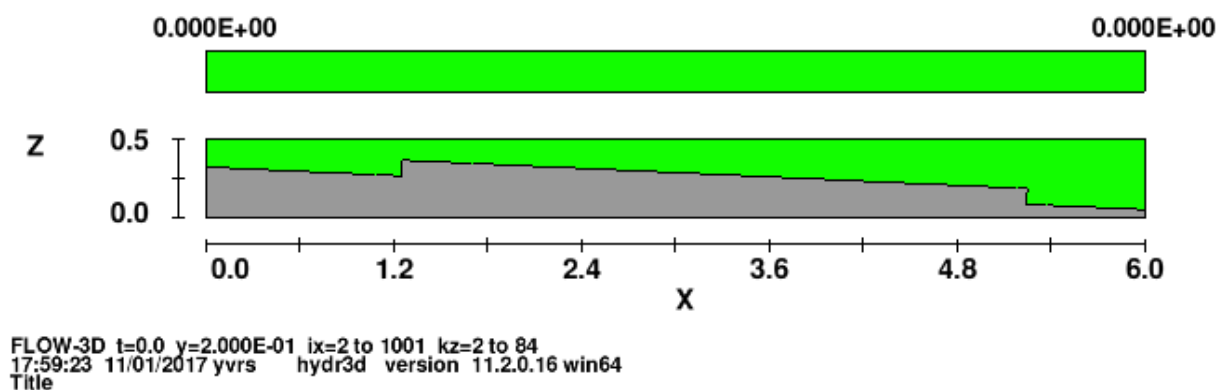


Figura 55 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.

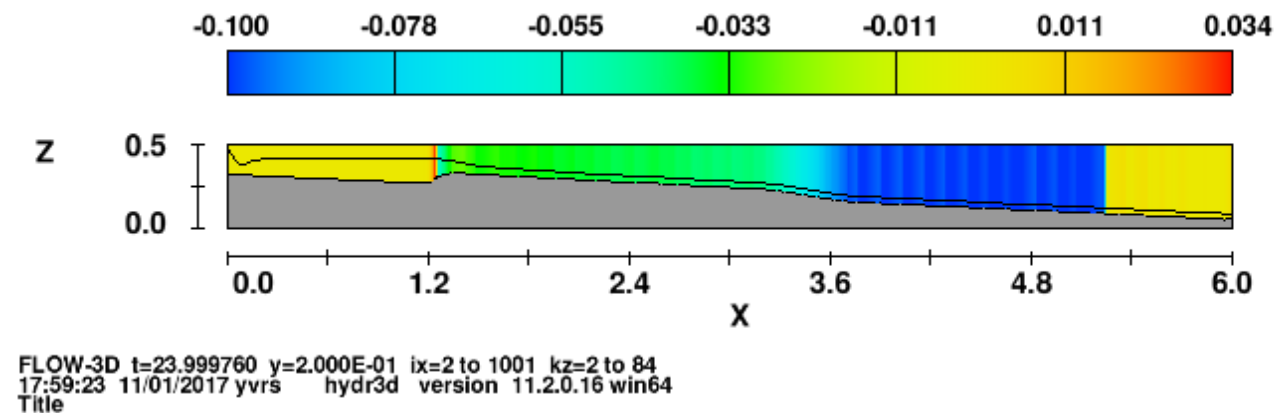


Figura 56 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 25 s.

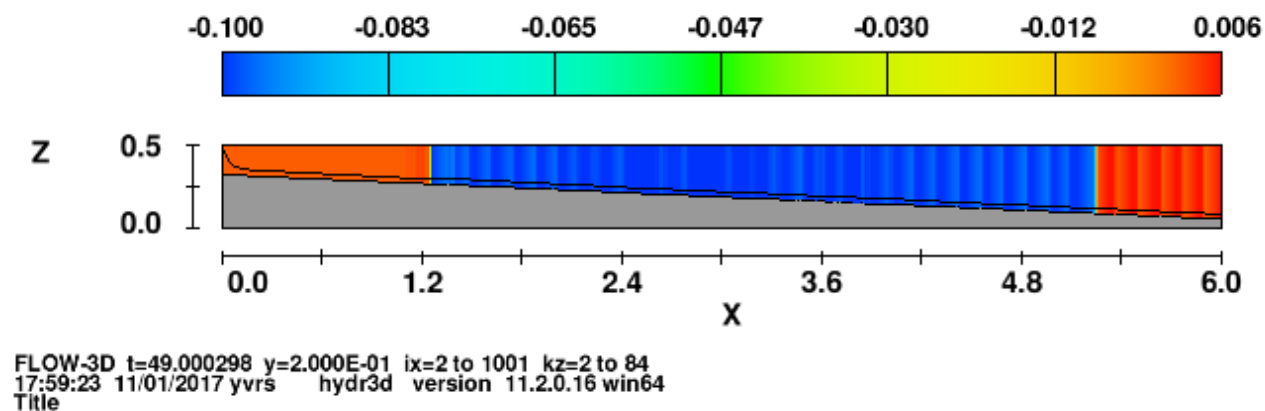


Figura 57 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 50 s.

Simulación Pendiente 4.5% Caso B

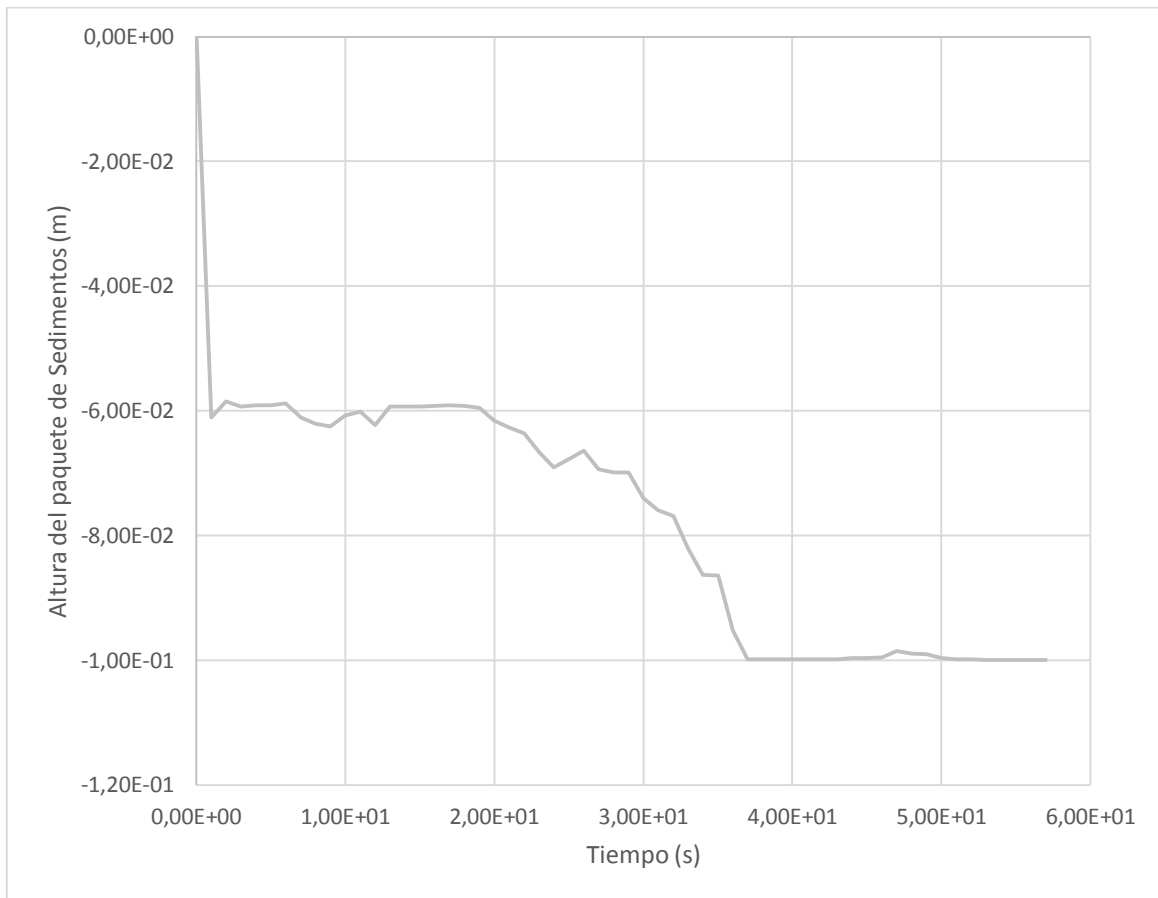


Figura 58 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 55s.

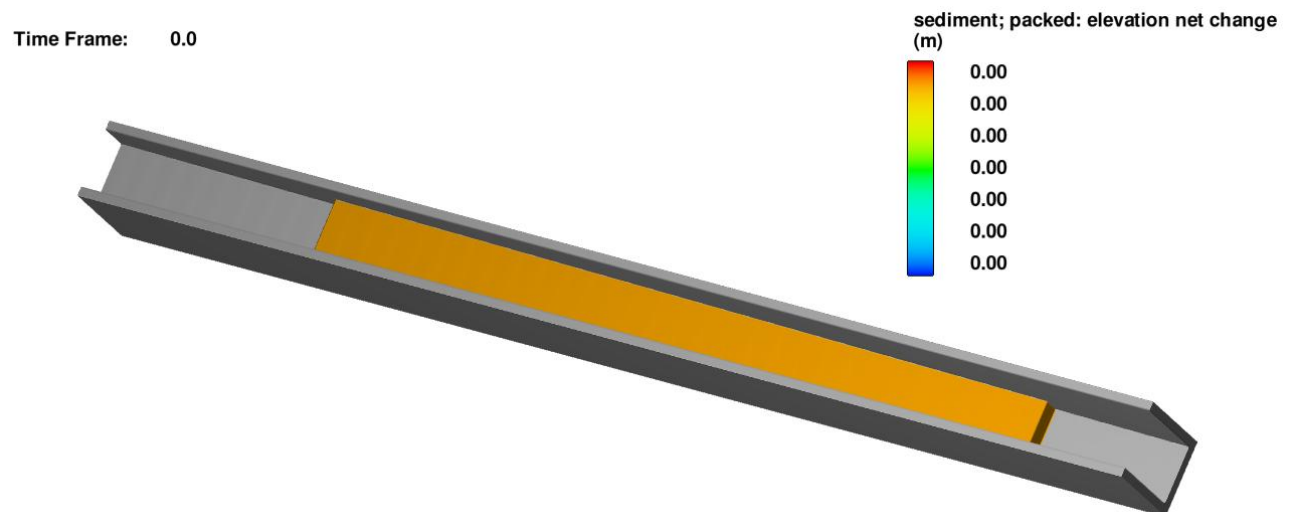


Figura 59 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.

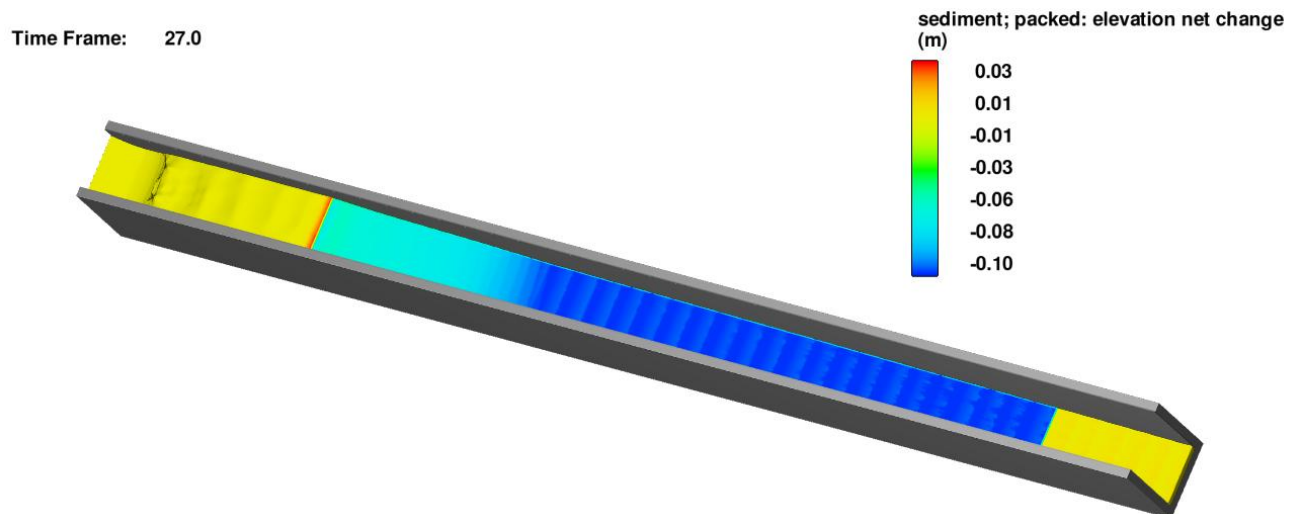


Figura 60 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 27s.

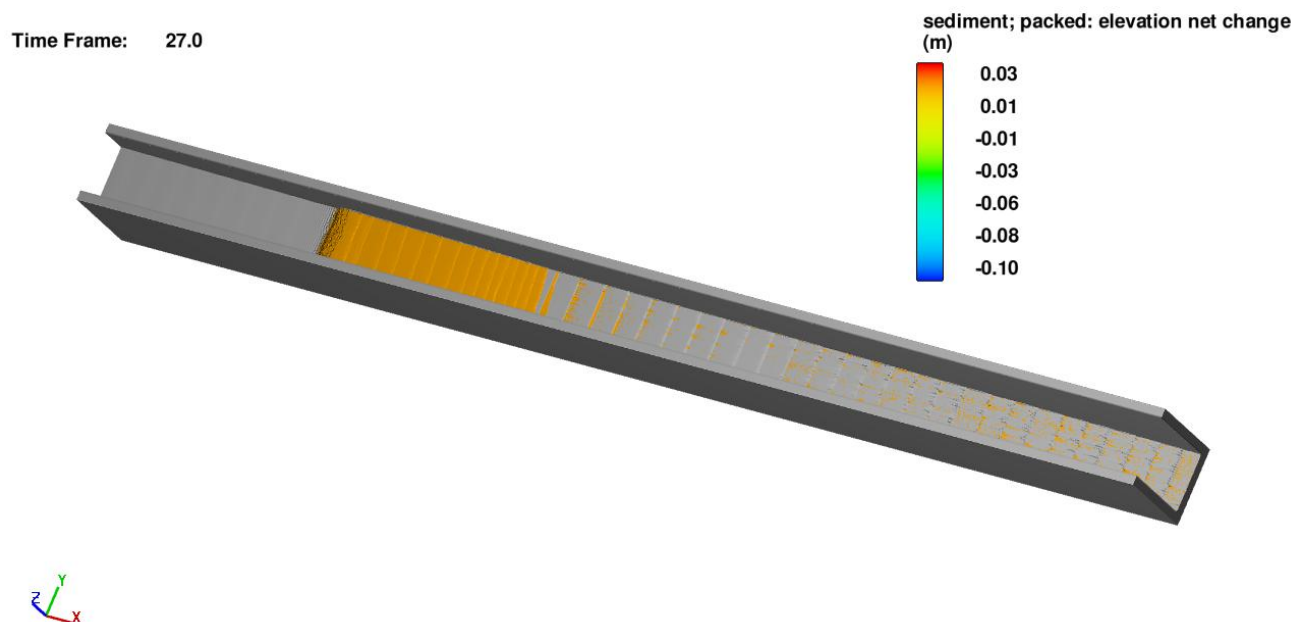


Figura 61 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 27 s.

Time Frame: 54.0

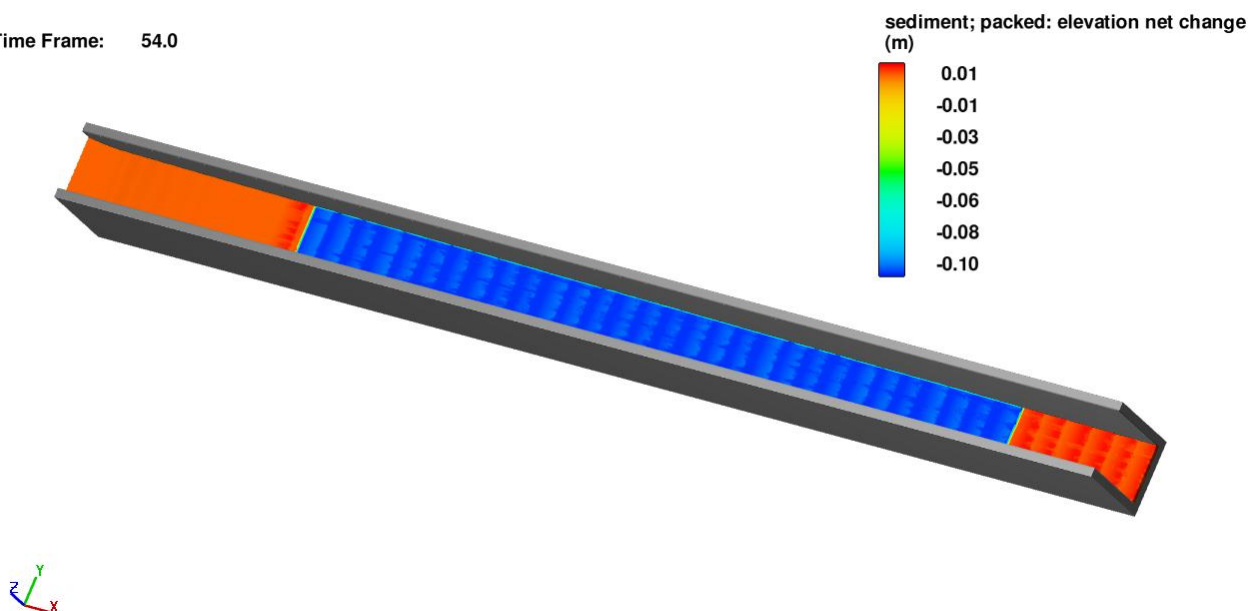


Figura 62 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 55s.

Time Frame: 54.0

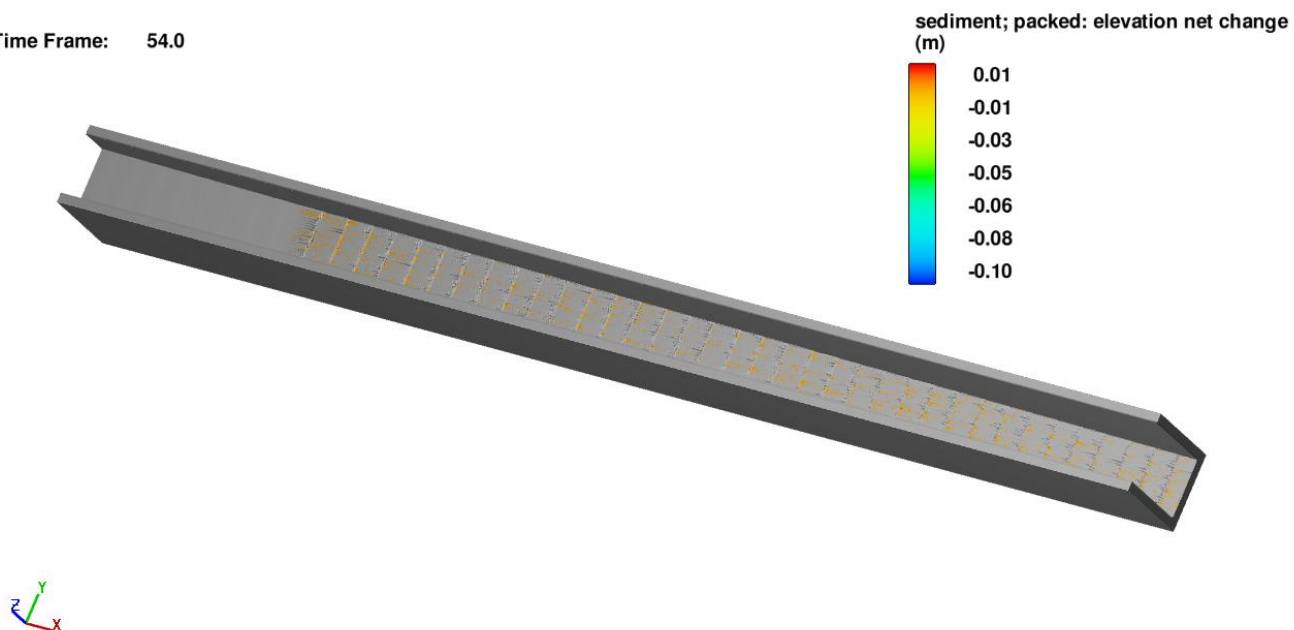


Figura 63 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 55 s.

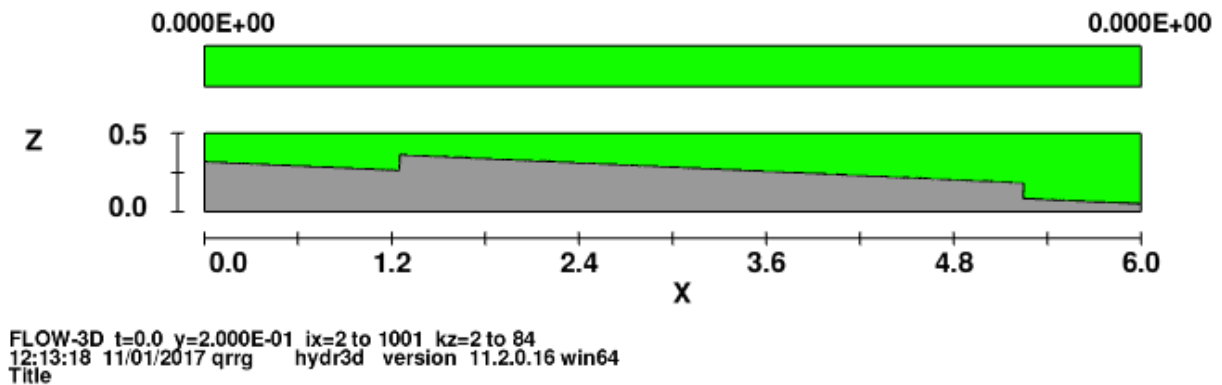


Figura 64 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.

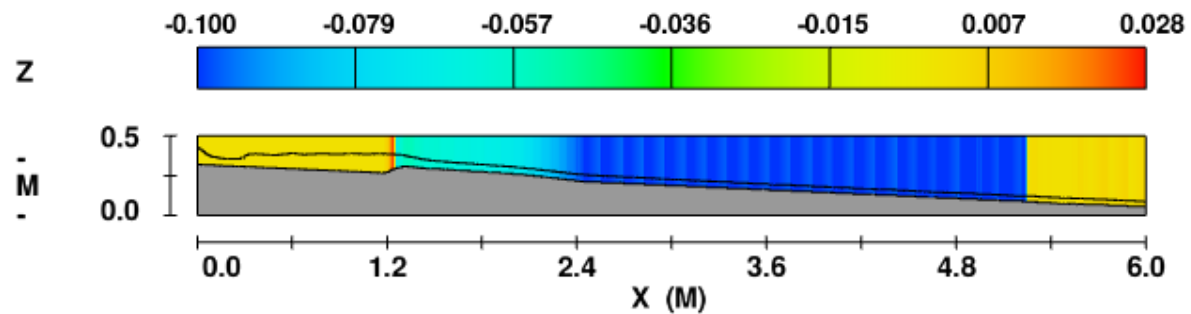


Figura 65 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 27 s.

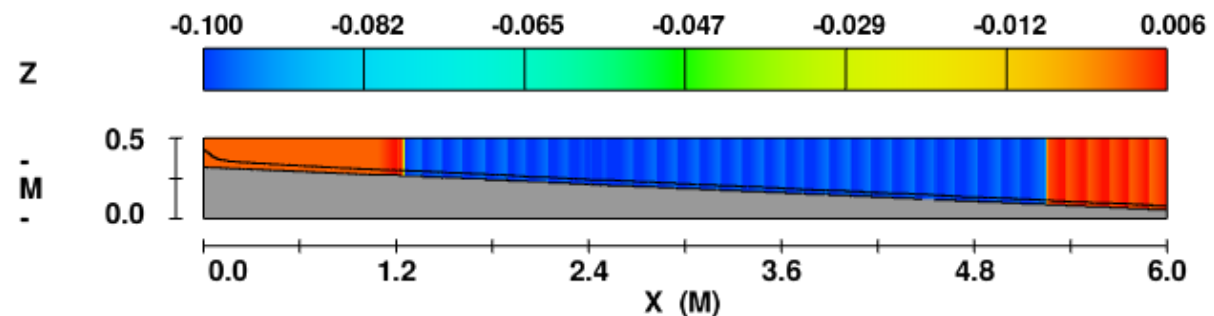


Figura 66 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 55 s.

Simulación Pendiente 4.5% Caso C

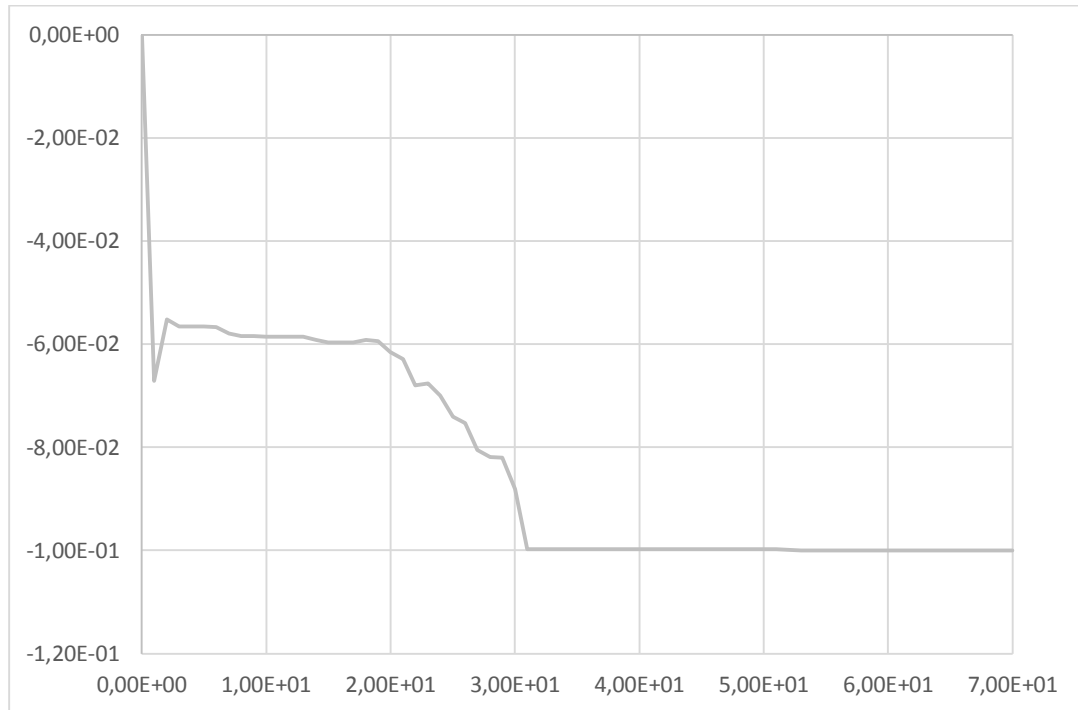


Figura 67 Variación de la altura del paquete sedimento respecto al tiempo, se estabiliza a los 54s.

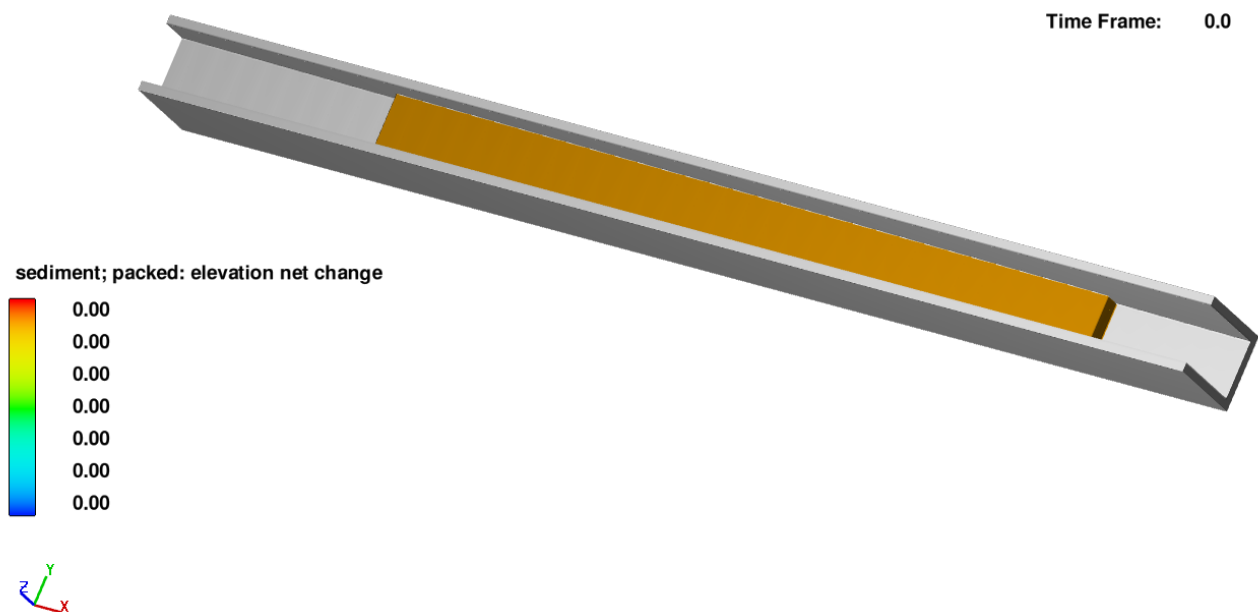


Figura 68 El gráfico muestra el canal con el paquete de sedimentos y la superficie de fluido en el tiempo = 0s.

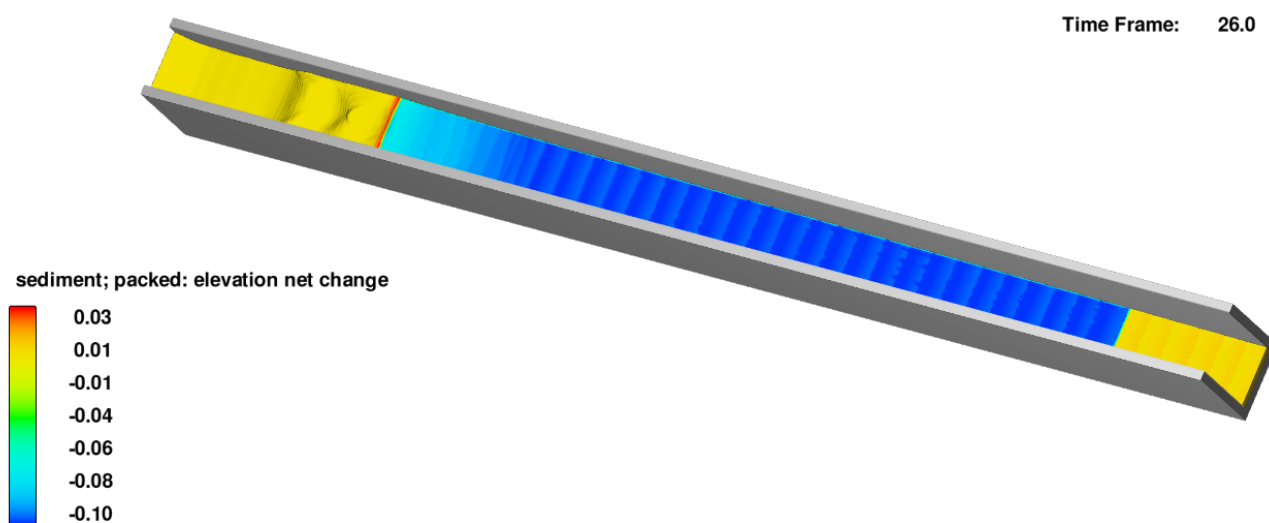


Figura 69 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 26s.

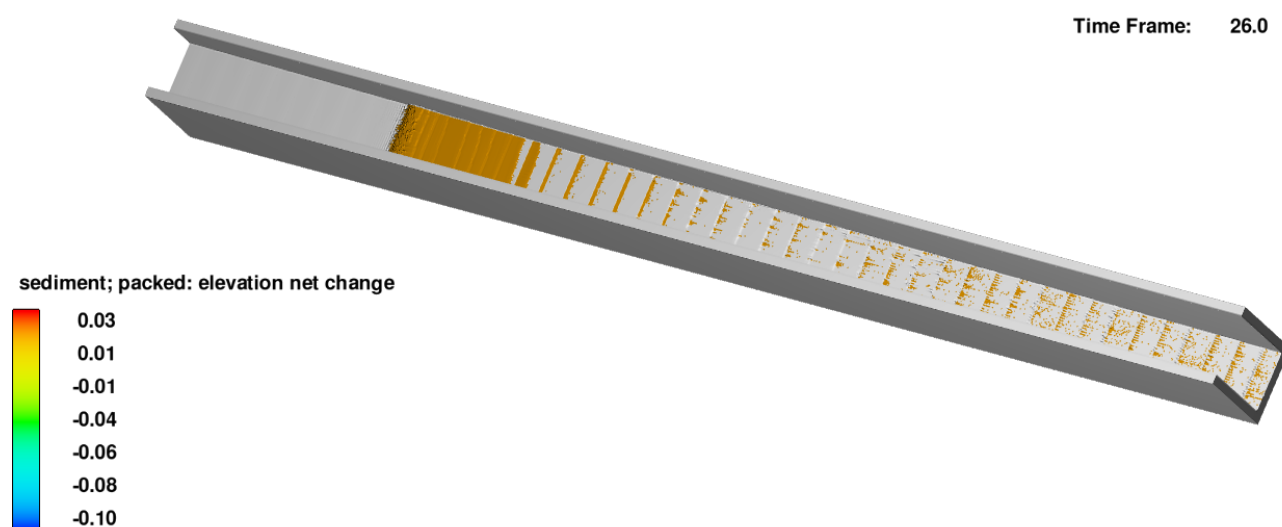


Figura 70 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 26 s.

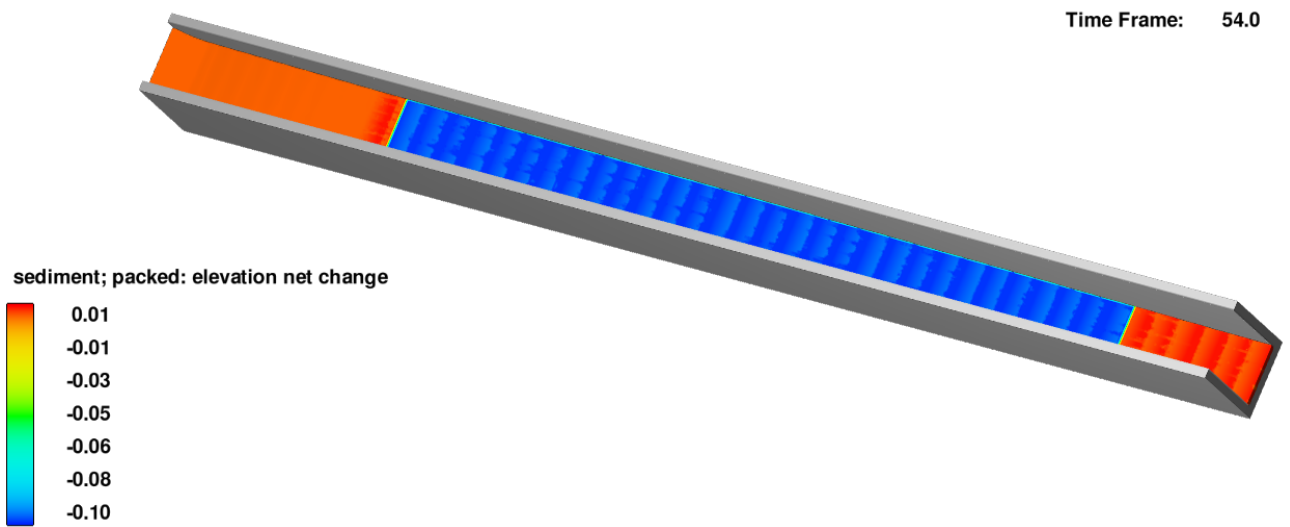


Figura 71 El gráfico muestra la altura del paquete de sedimentos en el canal y la superficie de fluido a los 54s.

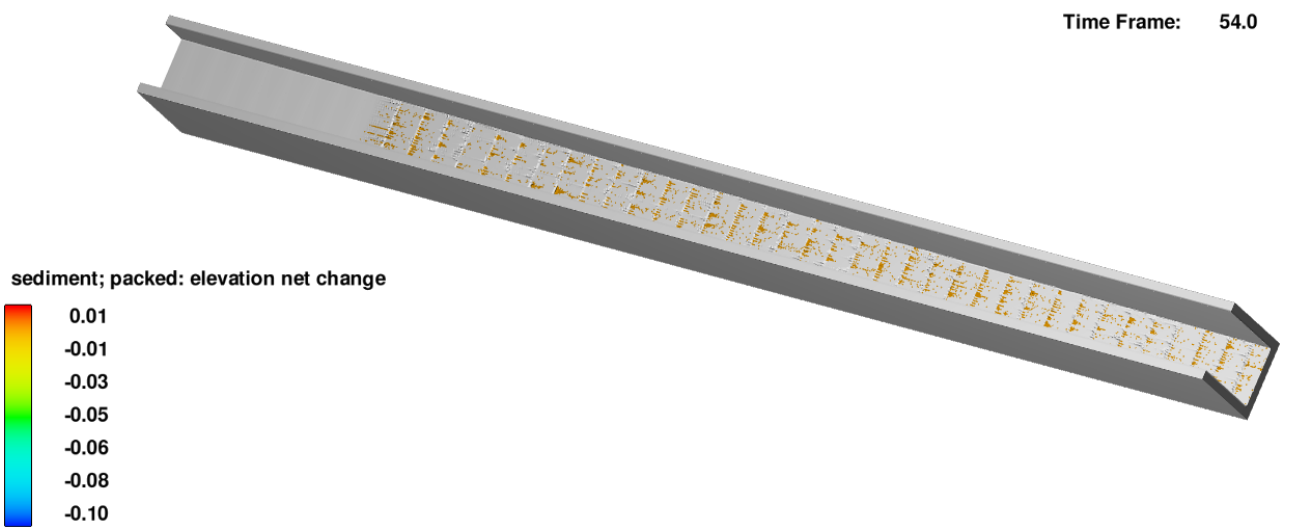
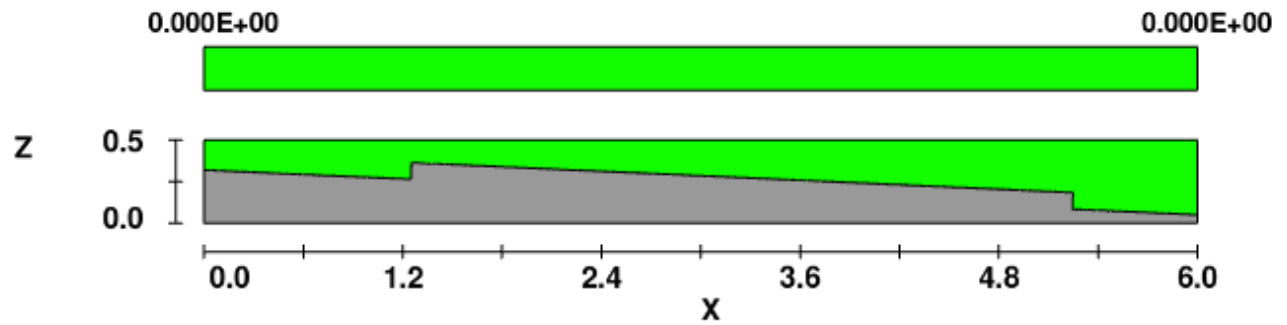
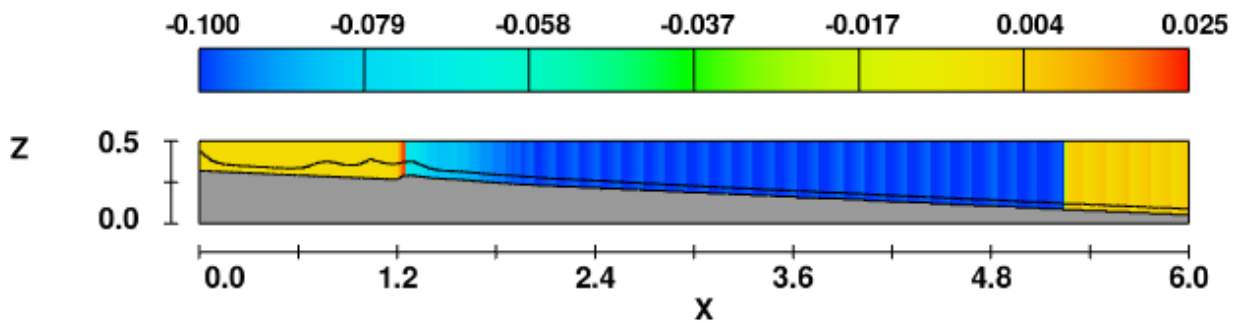


Figura 72 El gráfico muestra el transporte de los sedimentos por la acción del flujo a los 54 s.



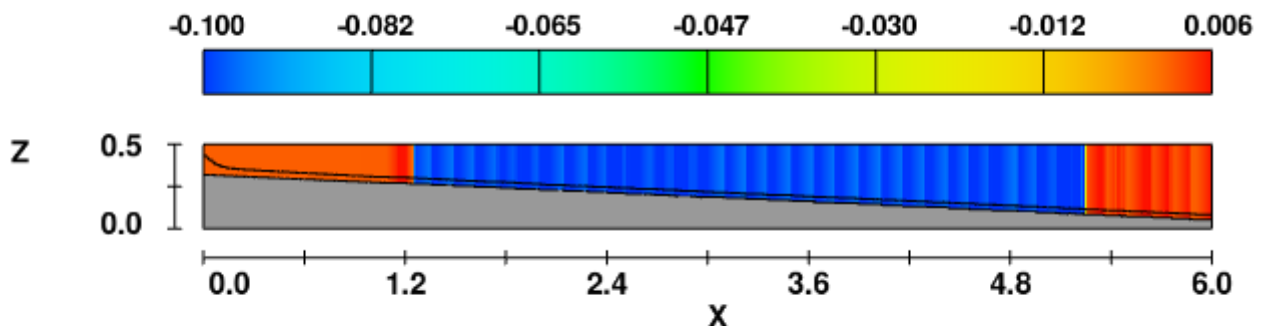
FLOW-3D t=0.0 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
19:21:30 11/01/2017 lmyv hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 73 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D al inicio de la simulación.



FLOW-3D t=26.000149 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
15:24:34 11/06/2017 viga hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 74 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 26 s.



FLOW-3D t=54.000126 y=2.000E-01 ix=2 to 1001 kz=2 to 84
15:24:34 11/06/2017 viga hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title

Figura 75 Variación de la altura del paquete sedimento en 2D a mitad de la simulación, Tiempo = 54 s.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería Civil